

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал

Издается с января 2002 года
Периодичность издания –
один раз в два месяца

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет



Science and Technique

International
Scientific and Technical Journal

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

Vol. 21 / No 2 / 2022

Журнал включен в базы данных:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G.,
Astashinsky V. M., Switala F.**
Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based
on Oxide Ceramics and M-Croll
(Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А.,
Девойно О. Г., Асташинский В. М.,
Свитала Ф.)
Многослойные композиционные
плазменные покрытия
на основе оксидной керамики и м-кролей) 93
- Шелег В. К., Романович А. С., Конопляник И. А.**
Мониторинг поломок резцов
исполнительного органа горного комбайна
по параметрам механических колебаний.
Часть 2. Методика создания системы
мобильного мониторинга поломок резцов
по параметрам механических колебаний
редуктора с собственной частотой 99
- Ермакова В. А., Гасперович Е. В., Ермаков А. И.,
Литвяк В. В.**
Исследование прочностных
характеристик изделий,
полученных методом 3D-печати из PLA 107

CONTENTS

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G.,
Astashinsky V. M., Switala F.**
Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based
on Oxide Ceramics and M-Croll 93
- Sheleg V. K., Romanovich A. S., Konoplianiuk I. A.**
Breakage Monitoring of Executive Body Cutters
in Continuous Miner According to Mechanical
Vibration Parameters.
Part 2. Methodology for Creating a System
for Mobile Monitoring of Cutter Breakages
According to the Parameters of Mechanical
Vibrations of the Gearbox with Natural Frequency 99
- Ermakova V. A., Gasperovich E. V., Ermakov A. I.,
Litvyak V. V.**
Study of Strength Characteristics
of Products Produced
by 3D-Printing from PLA 107

Строительство

- Зафатаев В. А., Ланкович С. В.,
Королёва Т. И., Нияковский А. М.**
Оценка эффективности энергосберегающей
системы организованной приточно-вытяжной
вентиляции для многоэтажных зданий
с низким уровнем тепловой защиты 114
- Вербицкая О. Л., Шевчук Л. И.**
Оптимизация прямоугольных шарнирно
опертых железобетонных гладких и ребристых
плит методом сокращения ресурсов 129
- Зиневич С. И., Каюмов А. К., Ковалев Д. М.**
Использование цементогранулята
в дорожном строительстве 134
- Sakanov D., Saginov Z., Mominova S.,
Ussenkulov Z., Kwang-don Kim**
Behavioral Characteristics of Cement Concrete
Pavements in South Kazakhstan: Climatic Changes
and Optimal Construction Method
(Саканов Д., Сагинов З., Моминова С.,
Уссенкулов Ж., Ким Кванг-дон Ким
Поведенческие характеристики
цементобетонных покрытий
в Южном Казахстане: климатические изменения
и оптимальный метод строительства) 142

Транспорт

- Капский Д. В., Кузьменко В. Н.,
Красильникова А. С., Семченков С. С.,
Кот Е. Н., Ларин О. Н.**
Анализ развития различных видов городского
электрического транспорта
в Полоцке и Новополоцке 150
- Chepeleva T. I., Chepelev A. N.**
Statistical Analysis of Industrial Processes
(Чепелева Т. И., Чепелев А. Н.
Статистический анализ производственных
процессов) 158

Энергетика

- Пехота А. Н.**
Исследование энергетических характеристик мно-
гокомпонентного твердого топлива
с использованием некондиционных горючих
коммунальных и производственных отходов 164

Civil and Industrial Engineering

- Zafatayeu V. A., Lankovich S. V., Karaliova T. I.,
Niyakovskii A. M.**
Effectiveness Assessment of Energy-Saving System
of Organized Supply and Exhaust Ventilation
for Multi-Storey Buildings with Low Level
Thermal Protection 114
- Verbitskaya O. L., Shevchuk L. I.**
Optimization of Rectangular Articulated Reinforced
Concrete Smooth and Ribbed Slabs Using Resource
Reduction Method 129
- Zinevich S. I., Kayumov A. K., Kovalyov D. M.**
Use of Cement Granulate
in Road Construction 134
- Sakanov D., Saginov Z., Mominova S.,
Ussenkulov Z., Kwang-don Kim**
Behavioral Characteristics of Cement Concrete
Pavements in South Kazakhstan: Climatic Changes
and Optimal Construction Method 142

Transport

- Kapskiy D. V., Kuzmenko V. N.,
Krasilnikava A. S., Semchenkov S. S.,
Kot E. N., Larin O. N.**
Analysis of Development of Various Types
of Urban Electric Transport
in Polotsk and Novopolotsk 150
- Chepeleva T. I., Chepelev A. N.**
Statistical Analysis of Industrial Processes 158

Power Engineering

- Pekhota A. N.**
Study of Energy Characteristics
of Multicomponent Solid Fuel
Using Substandard Municipal
and Industrial Waste Fuels 164

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*), заместитель главного редактора,
- Белый А. В.** (*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*),
- Бисби Л.** (*Эдинбургский университет, Эдинбург, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии*),
- Виттманн Ф. Х.** (*Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцарская Конфедерация*),
- Дидерихс У.** (*Ростокский университет, Росток, Федеративная Республика Германия*),
- Дмитриев С. М.** (*Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева, Нижний Новгород, Российская Федерация*),
- Згуровский М. З.** (*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*),
- Кондерс А. Б.** (*Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Федеративная Республика Германия*),
- Косёр-Казберук М.** (*Белостокский технический университет, Белосток, Республика Польша*),
- Леонович С. Н.** (*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*), заместитель главного редактора,
- Лю Тингуо** (*компания «Гаююань», провинция Хэнань, Китайская Народная Республика*),
- Макнами Р. Я.** (*Консультационное агентство по вопросам пожарной безопасности, Стокгольм, Королевство Швеция*),
- Максаров В. В.** (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация*),
- Нгуен Тху Нга** (*Научный энергетический институт, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам*),
- Одиназода Х. О.** (*Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан*),
- Опяляк М.** (*Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша*),
- Пенязьков О. Г.** (*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*),

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

- Aliakseyeu Yu. G.** (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*), Deputy Editor-in-Chief,
- Byeli A. V.** (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),
- Bisby L.** (*University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland*),
- Wittmann F. H.** (*ETH – Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich, Swiss Confederation*),
- Diederichs U.** (*University of Rostock, Rostock, Federal Republic of Germany*),
- Dmitriev S. M.** (*Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation*),
- Zgurovsky M. Z.** (*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*),
- Koenders A. B.** (*Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Federal Republic of Germany*),
- Kosior-Kozberuk M.** (*Bialystok University of Technology, Bialystok, Republic of Poland*),
- Leonovich S. N.** (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*), Deputy Editor-in-Chief,
- Liu Tingguo** (*Gaoyuan Company, Henan Province, People’s Republic of China*),
- McNamee R. J.** (*Brandskyddslaget AB, Stockholm, Kingdom of Sweden*),
- Maksarov V. V.** (*Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation*),
- Nguyen Thu Nga** (*Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam*),
- Odinazoda H. O.** (*Tajik Technical University named after Academic M. S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan*),
- Opielak M.** (*Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland*),
- Penyazkov O. G.** (*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*),

Пимьента П. (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),

Родригес Ж. П. К. (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),

Романюк Ф. А. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),

Сидерис К. (Фракийский университет имени Демокрита, Комотини, Греческая Республика),

Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),

Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникайш Девелоппмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),

Феличетти Р. (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),

Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),

Чижик С. А. (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Шелег В. К. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,

Ши Ли И (Научно-технологический парк Шанхайского университета, Шанхай, Китайская Народная Республика),

Эберхардштайнер Й. (Венский технический университет, Вена, Австрийская Республика),

Янковский А. (Технологический институт ВВС, Варшава, Республика Польша)

Ответственный секретарь редакционной коллегии
В. Г. Горбаш

Pimienta P. (Scientific and Technical Centre for the Building – CSTB Department, Saint-Martin-d'Hères, French Republic),

Rodrigues J. P. C. (University of Coimbra, Coimbra, Portuguese Republic),

Romaniuk F. A. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

Sideris K. (Democritus University of Thrace, Komotini, Hellenic Republic),

Sobolev K. (University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, United States of America),

Sumrov V. V. (Internet Communication Development Group Ltd – ICD, Riga, Republic of Latvia),

Felicetti R. (Polytechnic University of Milan, Milan, Italian Republic),

Zhao Ji (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),

Chizhik S. A. (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

Sheleg V. K. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,

Shi Li Yi (Science and Technology Park of Shanghai University, Shanghai, People's Republic of China),

Eberhardsteiner J. (Vienna University of Technology, Vienna, Republic of Austria),

Jankowski A. (Air Force Institute of Technology, Warsaw, Republic of Poland)

Executive Secretary of Editorial Board
V. G. Gorbash

Ведущий стилистический редактор

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by
http://sat.bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.
Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 31.03.2022. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 10,75. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2022

Leading Style Editor

V. N. Guryanchyk

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by
http://sat.bntu.by

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-93-98>

UDC 621.793.71

Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Croll

F. I. Panteleenko¹⁾, V. A. Okovity¹⁾, O. G. Devoino¹⁾, V. M. Astashinsky²⁾, F. Switala^{3, 4)}

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Samara State Technical University (Samara, Russian Federation),

⁴⁾Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II (Lublin, Poland)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Abstract. The paper considers the influence of the parameters of the plasma spraying process on the technological characteristics of multilayer coatings based on nickel-chromium, nickel-chromium-aluminum-yttrium materials, oxide ceramics, intended for operation at high temperature and additional dynamic loads. The design of plasma coatings during their application (with subsequent high-energy processing) under such conditions requires a comprehensive solution – both the use of high-quality powder ingredients and the optimization of technological parameters. The plasma process of applying powder materials has been improved to obtain the maximum values of their utilization factors. The technological characteristics that affect the properties of plasma coatings are optimized, namely: the flow rates of the plasma-forming and materials-transporting gases, the flow rate of supplied powder materials, the current and voltage of the electric arc of the plasma torch, the distance from the plasma torch nozzle exit to the substrate. The paper presents the results of studies of the structure of coatings, performed using scanning electron microscopy. Their analysis has made it possible to form general regularities obtained by the action of radiation of compression plasma flows on coatings formed by air plasma. The considered structures are created using the processes of melting, compaction and high-speed cooling of plasma coatings. The main optimization indicators are the maximum local compaction and spillage of the obtained compositions with the absence of defects and destruction from the impact of compression plasma flows. The main effect during the action of radiation of a compression plasma flow on previously formed coatings is thermal. It contributes heating of the near-surface layer. When the coating is exposed to radiation of compression plasma flows, a remelted layer of oxides with a thickness of about 12–15 μm is created, smoothing the relief of the formed surface and creating a network of cracks on the surface, diverging into the depth of the coating. The liquid-phase processes occurring in the molten phase of the near-surface layers after exposure to compression plasma radiation change the structure of the layers and contribute to the modification of their mechanical properties. By smoothing the surface, increasing the density of the surface crystallized layer and minimizing macro-defects – pores or macrocracks – the mechanical characteristics of the coatings increase.

Keywords: plasma torch, technological modes, optimization process, powder utilization factor, radiation of plasma compression flows, modification of near-surface layers, operational parameters

For citation: Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Switala F. (2022) Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Croll. *Science and Technique*. 21 (2), 93–98. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-93-98>

Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

Address for correspondence

Okovity Vjacheslav A.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

Многослойные композиционные плазменные покрытия на основе оксидной керамики и м-кролей

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,
канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾, докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾,
докт. техн. наук Ф. Свитала^{3, 4)}

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Самарский государственный технический университет (Самара, Российская Федерация),

⁴⁾Католический университет Люблина имени Иоанна Павла II (Люблин, Польша)

Реферат. Рассмотрено влияние параметров процесса плазменного напыления на технологические характеристики многослойных покрытий на базе материалов никель-хром и никель-хром-алюминий-иттрий, оксидной керамики, предназначенных для эксплуатации при высоких температурных и дополнительных динамических нагрузках. Конструирование плазменных покрытий при их нанесении (с последующей высокоэнергетической обработкой) в таких условиях требует комплексного решения – как применения качественных порошковых ингредиентов, так и оптимизации технологических параметров. Усовершенствован плазменный процесс нанесения порошковых материалов для получения максимальных значений их коэффициентов использования. Оптимизированы технологические характеристики, оказывающие влияние на свойства плазменных покрытий, а именно: величины расходов плазмообразующего и транспортирующего материалы газов, расход подаваемых порошковых материалов, ток и напряжение электрической дуги плазменной горелки, расстояние от среза сопла плазматрона до подложки. В статье приведены результаты исследований структуры покрытий, выполненных с применением растровой электронной микроскопии. Их анализ позволил сформировать общие закономерности, получаемые при воздействии излучения компрессионных плазменных потоков на сформированные воздушной плазмой покрытия. Рассмотренные структуры созданы при помощи процессов плавления, уплотнения и высокоскоростного охлаждения плазменных покрытий. Основные показатели оптимизации – максимальное локальное уплотнение и проплавление полученных композиций с отсутствием дефектов и разрушений от воздействия потоков компрессионной плазмы. Главный эффект при воздействии излучения компрессионного плазменного потока на ранее сформированные покрытия – тепловой. Он способствует нагреву приповерхностного слоя. При действии на покрытия излучения компрессионных плазменных потоков создается переплавленный слой оксидов толщиной порядка 12–15 мкм, сглаживающий рельеф сформированной поверхности и создающий на поверхности сетку трещин, расходящихся в глубину покрытия. Происходящие в расплавленной фазе приповерхностных слоев жидкофазные процессы после воздействия излучения компрессионной плазмы изменяют структуру слоев и способствуют модификации их механических свойств. Благодаря сглаживанию поверхности, увеличению плотности поверхностного закристаллизованного слоя и минимизации макродефектов – пор или макротрещин – повышаются механические характеристики покрытий.

Ключевые слова: плазменная горелка, технологические режимы, процесс оптимизации, коэффициент использования порошка, излучение плазменных компрессионных потоков, модификация приповерхностных слоев, эксплуатационные параметры

Для цитирования: Многослойные композиционные плазменные покрытия на основе оксидной керамики и м-кролей / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 93–98. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-93-98>

Introduction

The design of new ceramic composites is based on the need to further improve the properties of plasma coatings for operation under high-temperature operation and under conditions of intense wear [1–5]. The process of plasma spraying is one of the most widespread methods of deposition of coatings from ceramics and especially oxide ceramic materials in production [6–9]. This method of creating coatings is universal, since using one apparatus in the appropriate modes, various materials can be applied to surfaces and a number of restorative and hardening technologies can be implemented. It makes it possible to manufacture a wide range of parts with minimal costs for technological equipment [10]. The effectiveness of protection against failure of mechanisms at high energy loads is limited by the impact resistance of the materials used. Spacecraft protection is based on the use of high-

strength materials with minimal density, high viscoplasticity and hardness [1, 3]. The effectiveness of protection is characterized by the ability to absorb kinetic energy, determined by the impact resistance of the materials used. Sufficient ductility and strength characteristics are important elements for extending service life. An increase in hardness indicators corresponds to a decrease in viscosity and plasticity indicators, which causes brittle fracture processes. The formed gradient plasma coatings with a ceramic outer layer and a metal substrate are characterized by high impact strength. One of the most frequent defects in the plasma deposition of oxide ceramics is the flaking of the created coatings [11]. It is associated with a large difference between the values of the thermal expansion coefficients of the oxide layer and the substrate metal. Metal sublayers serve for possible smoothing of the values of the temperature coefficients of linear expansion [12–17]. When choosing substrate materials, it is also necessary to ensure

a high level of adhesive strength at the interface [17–21]. The main functional task of the sublayer in the created plasma coatings is the maximum plastic relaxation of the stress index, which is created during an incompatible change in the volumes of metal and ceramics in the case of heating and cooling of the created coating. The operational ductility of alloys decreases due to a complex of high-temperature oxidation processes, since the ceramic layer is gas-permeable; therefore, the sublayer materials must have high thermal resistance [20]. Accordingly, the binder sublayer must solve two main problems:

- 1) maintain the required level of plasticity in the operating range of operating temperatures;
- 2) maintain its heat resistance. It is difficult to solve these problems comprehensively.

The optimization of the phase and chemical composition of the alloy obtained is required. Therefore, the main goal of the ongoing research is to optimize the technological characteristics of the plasma process for the deposition of multilayer

structures on substrates that reproduce products used for protection against high-temperature damage.

Optimization of technological characteristics of the process of deposition of multilayer gradient coatings

When implementing plasma spraying, a number of factors affect the properties of the coatings being formed. The main ones are: the consumption of the plasma-forming and carrier gas of the powder material, the consumption of the sprayed materials, the current and voltage of the electric arc of the plasma torch, the distance from the plasma torch nozzle exit to the base, and the speed of the substrate. As an example (Fig. 1) the results of the optimization of the process of plasma formation of layers based on oxide ceramics (zirconium dioxide stabilized with yttrium oxide) with intermediate metal layers (nickel-chromium and nickel M-Croll), which under the specified sputtering conditions are characterized by the corresponding coefficients of the use of the powder material, are presented (KIP, %).

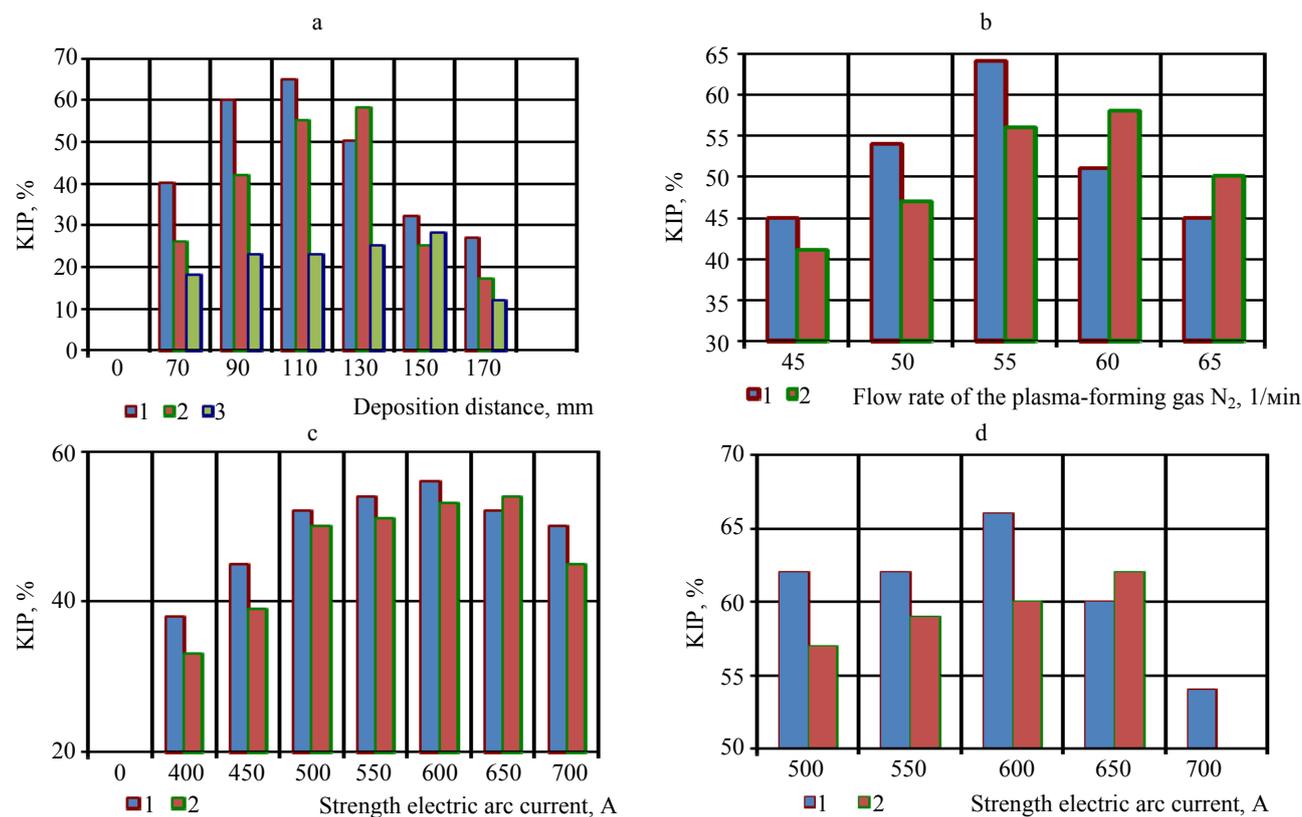


Fig. 1. Dependencies KIP of the technological characteristics of the spraying process:

- a – deposition distance L , mm, for powders $ZrO_2-Y_2O_3$ (1 – with a fraction of 50–63 microns; 2 – fraction of 63–80 microns; 3 – with a fraction of 80–100 microns; $I = 500$ A; $R_N = 45$ l/min; $R_{por} = 4.5$ kg/h);
- b – flow rate of the plasma-forming gas N_2 for $ZrO_2-Y_2O_3$ powders (M-Croll sublayer) (1 – with a fraction of 40–63 microns; 2 – with a fraction of 63–80 microns; $L = 100$ mm; $I = 500$ A; $R_{por} = 4.5$ kg/h);
- c – strength electric arc current I , A, for $ZrO_2-Y_2O_3$ powders (nichrome sublayer) (1 – with the flow rate of plasma-forming gas N_2 $R_N = 55$ l/min; 2 – with $R_N = 50$ l/min; $L = 100$ mm; $R_{por} = 4.5$ kg/h, with a fraction of 40–63 microns);
- d – strength electric arc current I , A, for powders $ZrO_2-Y_2O_3$ (M-Croll sublayer) (1 – with the flow rate of the plasma-forming gas N_2 $R_N = 55$ l/min; 2 – with $R_N = 50$ l/min; $L = 100$ mm; $R_{por} = 4.5$ kg/h, with a fraction of 40–63 microns)

In the case of small sputtering distances, the particle does not have time to heat up and reaches the substrate at a temperature $< t_{pl}$. In our case, an increase in the KIP to values $L = 100$ mm for powder material $ZrO_2-Y_2O_3$ with a fraction of $40-63 \mu m$ and to values of $L = 110$ mm with a fraction of $63-80 \mu m$ with a further increase in the distance, the particle melts, being in the jet for a long time, and is sprayed when hitting the substrate. This causes the KIP to fall [15]. When the electric arc current and plasma gas flow rates increase to certain values (Fig. 1b-d), a corresponding correlation of the instrumentation occurs, since these characteristics affect the degree of penetration of the powder material [11-14]. With their further increase, overheating and splashing occurs when it hits the substrate; therefore, KIP decreases. As the N_2 flow rate increases, the current maximum KIP values decrease.

The morphology of the coating surface, changed by the flows of compression plasma

Under the action of compression plasma flows on multilayer gradient coatings formed on substrates and consisting of a solid layer of the oxide phase $ZrO_2-Y_2O_3$ and viscous sublayers (Ni-Cr-Al-Y; Ni-Cr), the surface layer changes. Analysis of the obtained microstructures and mechanical properties made it possible to construct schemes for the effect of compression plasma on these coatings. The main defining effect of the compression plasma flow on the formed surface of the coatings is thermal, which promotes overheating of the layer near the surface. Heating by a flow of compression plasma $ZrO_2-Y_2O_3$ ensures its melting, despite the high melting temperatures of the material 2715, the resulting melt is heated above the melting temperature. High characteristics of the temperature gradient (~ 105 K/m) in the molten layer of the formed coating, accompanied by the mechanical effect of plasma flows on the surface of the resulting melt, pressure in the shock-compressed layer and the development of hydrodynamic effects create instability at the boundaries of intermediate phases during mixing of the molten layer and promote homogenization at its elemental composition. According to the equilibrium diagram of binary systems of elements Zr-O, zirconium oxide $ZrO_2-Y_2O_3$ creates a wide range of homogeneity

(from the oxygen concentration of about 40 % atomic fractions). Therefore, plasma coatings based on zirconium oxide $ZrO_2-Y_2O_3$ are more preferable due to the possibility of maintaining the oxide modification of the surface layer after exposure to a compressive flow of compression plasma and even after repeated exposure, which, as mentioned above, creates a change in the ratio of metal and oxygen atoms. In addition, with partial evaporation of melt atoms and hydrodynamic stirring of the melt layer, the concentration of atoms in technological impurities, which are always present in the obtained coatings, decreases. The surface of coatings based on metal oxides is characterized by increased roughness, combining sintering of individual powder particles when creating a coating (Fig. 2). After the action of the compressive compressive plasma flow, the composition of the melt is hydrodynamically mixed, and this, due to the forces of surface tension, leads to the leveling of the surface after the crystallization process (Fig. 2). High values of cooling rates in melts due to intensive heat removal to the unmelted part of the samples leads to rapid crystallization; as a result, high mechanical stresses are created in the crystallized solid phase, which causes the formation of surface cracks.

As a rule, the quantitative values of cracks, their location in space and average dimensions do not depend on the coating being treated. For the practical use of multilayer plasma coatings, coatings with a viscous layer based on Ni-Cr-Y-Al, including elements of a single-layer solid oxide (yttrium), are optimal and a support element (aluminum). The diffusion bonding of the intermediate layer with the outer oxide layer and the substrate can increase the adhesion parameters and exclude delamination of individual layers under external influences. Changes in structures in the near-surface layer of the created coatings after exposure to radiation of compression plasma flows lead to a change in their mechanical properties. The effect of surface leveling, an increase in the density of the crystallized layer. the absence of macrodefects, such as pores and macrocracks, makes it possible to increase the mechanical properties of the formed surfaces, as evidenced by a decrease in the coefficient of friction.

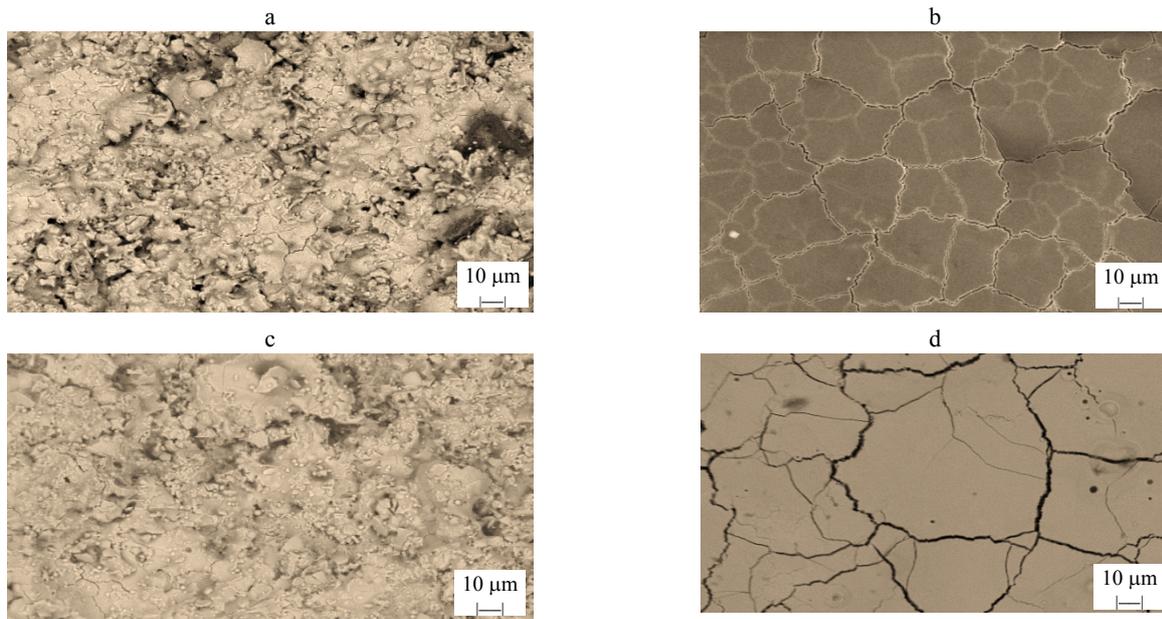


Fig. 2. SEM-image of the surface of the formed coatings before and after the compression plasma flow: a; b – using a NiCr sublayer and an upper $ZrO_2-Y_2O_3$ layer; c, d – using the NiCrAlY sublayer and the upper $ZrO_2-Y_2O_3$ layer; a, c – after the deposition process; b, d – after the treatment with a compression plasma flow ($\times 1000$ increase)

The presence of surface cracks in the treated layer adversely affects the change in the coefficient of friction and leads to its increase. They can be a source for creating internal stresses, which lead to the destruction of the resulting coatings and an increase in their abrasive wear. At the same time, coatings based on zirconium oxide $ZrO_2-Y_2O_3$, with a formed hardened layer based on zirconium nitride ZrN , have a reduced coefficient of friction after exposure to compressive compression plasma currents.

CONCLUSIONS

1. The design and creation of new systems of multilayer plasma coatings based on new powder materials or integrated technologies is necessary for the further advancement of technologies using plasma in modern conditions due to an increase in dynamic loads, an increase in operating temperatures, price and environmental requirements for technological equipment. The technologies considered in the article for the formation of metal-oxide coatings using plasma spraying in air and subsequent modification using compression plasma flows are precisely designed to solve these problems. As a result of the research carried out,

the optimization of the modes of plasma spraying of multilayer oxide layers was carried out, their properties, morphology and microstructure of the created surfaces were determined, and the layers after exposure to compressive compressive plasma flows were investigated. In the process of plasma spraying, the properties of the formed coatings are influenced by a number of parameters that have been optimized.

2. The most important of them are: the consumption of plasma-forming and transporting gases, the consumption of the sprayed material, the current and voltage of the plasma torch electric arc, the distance from the outlet of the plasma torch nozzle to the substrate, the velocity of the substrate relative to the plasma torch. The results of the study of the morphology, structures and compositions of the created coatings, using a scanning electron microscope, are presented. The analysis of the structures created for the coatings made it possible to assess the regularities of their formation under the influence of a compressive compressive plasma flow. It is shown that the resulting effects from compression flows on the created multilayer metal-ceramic coatings are modified in the near-surface layer to a depth of 15–20 microns, its melting and crystallization occurs, leading to an increase

in density. The occurring liquid-phase processes accompanying the melting of layers at the surface change the morphological properties of the formed surface due to a decrease in the quantitative values of roughness. This changes the mechanical and tribological characteristics of the formed coatings, leading to a decrease in friction coefficients and an increase in wear resistance parameters.

REFERENCES

1. Panteleenko F. I., Okovity V. A. (2019) *Formation of Multifunctional Plasma Coatings Based on Ceramic Materials*. Minsk, BNTU. 251 (in Russian).
2. Devoino O. G., Okovity V. V. (2014) Plasma Heat-Protective Coatings Based on Zirconium Dioxide with Increased Heat Resistance. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (6), 3–10 (in Russian).
3. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., As-tashinsky V. M., Okovity V. V., Sobolevsky S. B. (2015) Development of Technology for Applying Plasma Composite Coatings Based on Zirconium Dioxide for Spacecraft Systems. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 5–9 (in Russian).
4. Okovity V. V. (2015) The Choice of Oxides for Stabilizing Zirconium Dioxide in the Production of Heat-Protective Coatings of Devices. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 26–32 (in Russian).
5. Devoino O. G., Okovity V. V. (2015) High-Energy Processing of Plasma Coatings Based on Zirconium Dioxide. *Innovatsii v Mashinostroenii (InMash-2015): Sbornik Trudov VII Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii* [Innovations in Engineering (InMash-2015): Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference]. Kemerovo, T. F. Gorbachev State Technical University, 332–335 (in Russian).
6. Khoddami A. M., Sabour A., Hadavi S. M. M. (2007) Microstructure Formation in Thermallysprayed Duplex and Functionally Graded NiCrAlY/Yttria-Stabilized Zirconia Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201 (12), 6019–6024. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.020>.
7. Davis J. R. (2004) *Handbook of Thermal Spraying Technology*. ASM International. 338.
8. Bergstrom T., Yetrehus T. (1984) Gas Motion in Front of a Completely Absorbing Wall. *The Physics of Fluids*, 27 (3), 583–588. <https://doi.org/10.1063/1.864655>.
9. Mann B. S., Prakash B. (2000) High Temperature Friction and Wear Characteristics of Various Coating Materials for Steam Valve Spindle Application. *Wear*, 240 (1–2), 223–230. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00390-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00390-2).
10. Johnson R. N. (1974) Wear Resistant Coatings for Reactor Components in Liquid Sodium Environments. *Vacuum Science and Technology*, 11 (4), 759–764. <https://doi.org/10.1116/1.1312748>.
11. Li C. C. (1980) Characterization of Thermally Sprayed Coatings for High Temperature Wear Protection Applications. *Thin Solid Films*, 73 (1), 59–77. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(80\)90329-6](https://doi.org/10.1016/0040-6090(80)90329-6).
12. Bryan W. J., Jones D. (1995) *Wear Resistant Coating for Components of Fuel Assemblies and Control Assemblies, and Method of Enhancing Wear Resistance of Fuel Assembly and Control Assembly Components Using Wear-Resistant Coating*. Patent US No 5434896.
13. Matthews S., James B., Hyland M. (2013) High Temperature Erosion-Oxidation of Cr₃C₂-NiCr Thermal Spray Coatings under Simulated Turbine Conditions. *Corrosion Science*, 70, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.01.030>.
14. Bose S. (2007) *High Temperature Coatings*. Oxford, Butterworth-Heinemann. 293. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8252-7.X5000-8>.
15. Cabral-Miramontes J. A. (2014) Parameter Studies on High-Velocity Oxy-Fuel Spraying of CoNiCrAlY Coatings Used in the Aeronautical Industry. *International Journal of Corrosion*, (3), 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/703806>.
16. Demian C., Denoirjean A., Pawłowski L., Denoirjean P., El Ouardi R. (2016) Microstructural Investigations of NiCrAlY + Y₂O₃ Stabilized ZrO₂ Cermet Coatings Deposited by Plasma Transferred Arc (PTA). *Surface and Coatings Technology*, 300, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.046>.
17. Sun X. (2012) Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of HVOF Sprayed NiCrAlY Coatings without and with Nano Shogiat. *Journal of Thermal Spraying Technology*, 21, 818–824. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9760-3>.
18. Zhou L. (2012) Microwave Dielectric Properties of Low Power Plasma Sprayed NiCrAlY/Al₂O₃ Composite Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 210, 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.002>.
19. Lee J. H., Lee D. B. (2010) Hot Corrosion of NiCrAlY/(ZrO₂-CeO₂-Y₂O₃) Composite Coatings in NaCl-Na₂SO₄ Molten Salt. *Materials Science Forum*, 658, 228–231. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.658.228>.
20. Zhu C. (2015) Microstructure and Oxidation Behavior of Conventional and Pseudo Graded NiCrAlY/YSZ Thermal Barrier Coatings Produced by Supersonic Air Plasma Spraying Process. *Surface and Coatings Technology*, 272, 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.014>.
21. Lee D. B., Lee C. (2005) High-Temperature Oxidation of NiCrAlY/ZrO₂-Y₂O₃ and ZrO₂-CeO₂-Y₂O₃ Composite Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 193 (1–3), 239–242. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.140>.

Received: 20.10.2021

Accepted: 21.12.2021

Published online: 31.03.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-99-106>

УДК 622.232.054.54-044.952-047.36:621.83.061.1-026.31 (045)

Мониторинг поломок резцов исполнительного органа горного комбайна по параметрам механических колебаний

Часть 2. Методика создания системы мобильного мониторинга поломок резцов по параметрам механических колебаний редуктора с собственной частотой

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾, А. С. Романович²⁾, канд. техн. наук И. А. Конопляник²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Унитарное производственное предприятие «Нива» Романовича С. Г. (Солигорск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Создание системы мобильного мониторинга для диагностики технического состояния объектов горной техники по параметрам механических колебаний является одним из самых наукоемких направлений. В статье приведены результаты изучения возможности выделения возникающих при поломках резцов на режущих дисках двухпоточных приводов исполнительного органа горного комбайна механических колебаний рукоятей с собственной частотой ≈ 5 Гц, которая с большей или меньшей амплитудой присутствует практически во всех зарегистрированных спектрах. Поэтому ее можно использовать для оперативного мобильного мониторинга поломок резцов исполнительных органов горных комбайнов. Анализ колебаний подтвердил, что они передаются практически на все невращающиеся части комбайна, где могут быть зарегистрированы, что позволяет использовать их для мобильного автоматизированного мониторинга поломок резцов на режущих дисках. На примере комбайна «Универсал-600» установлено, что наиболее удобным при регистрации этих колебаний с позиции отсутствия необходимости введения в измерительный тракт модуля передачи сигнала с вращающихся частей комбайна можно считать размещение датчика вибрации на корпусе входного редуктора привода исполнительного органа с ориентацией его в направлении движения комбайна, где колебания частотой 5 Гц являются преобладающими и их достаточно просто выделить из низкочастотного диапазона с использованием стандартизированных низкочастотных третьоктавных фильтров. Предложена методика создания системы автоматизированного мобильного мониторинга поломок резцов по параметрам механических колебаний режущих дисков с собственной частотой.

Ключевые слова: горный комбайн, вибрация, мобильный мониторинг, собственные колебания, поломка

Для цитирования: Шелег, В. К. Мониторинг поломок резцов исполнительного органа горного комбайна по параметрам механических колебаний. Часть 2: Методика создания системы мобильного мониторинга поломок резцов по параметрам механических колебаний редуктора с собственной частотой / В. К. Шелег, А. С. Романович, И. А. Конопляник // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 99–106. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-99-106>

Breakage Monitoring of Executive Body Cutters in Continuous Miner According to Mechanical Vibration Parameters

Part 2. Methodology for Creating a System for Mobile Monitoring of Cutter Breakages According to the Parameters of Mechanical Vibrations of the Gearbox with Natural Frequency

V. K. Sheleg¹⁾, A. S. Romanovich²⁾, I. A. Konoplianiuk²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Unitary Production Enterprise [UPE] “Niva” of Romanovich S. G. (Soligorsk, Republic of Belarus)

Abstract. The development of research in the field of creating a mobile monitoring system for diagnosing the technical condition of mining equipment in terms of mechanical vibration parameters is one of the most science-intensive areas. The paper presents the results of investigations on the possibility of isolating the mechanical vibrations of the handles with a natural

Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Address for correspondence

Sheleg Valery K.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

frequency of ≈ 5 Hz, which occur with a greater or lesser amplitude in almost all registered spectra, arising from breakages of cutters on the cutting discs of double-flow drives of the executive body of a mining machine. Therefore, it can be used for operational mobile monitoring of breakages in the cutters of the executive bodies of mining machines. An analysis of vibrations has confirmed the fact that they are transmitted to almost all non-rotating parts of the combine, where they can be registered, which allows them to be used for mobile automated monitoring of cutter breakages on cutting discs. On the example of the combine "Universal-600" it has been found that the most convenient when registering these vibrations from the standpoint of the absence of the need to introduce a signal transmission module from the rotating parts of the combine into the measuring path can be considered the placement of a vibration sensor on the body of the input gearbox of the executive body drive with its orientation in the direction combine movements, where oscillations with a frequency of 5 Hz are prevalent and it is quite simple to isolate them from the low-frequency range using standardized low-frequency one-third octave filters. The paper proposes a technique for creating a system for automated mobile monitoring of cutter breakages based on the parameters of mechanical vibrations of cutting discs with natural frequency.

Keywords: mining machine, vibration, mobile monitoring, natural vibrations, breakage

For citation: Sheleg V. K., Romanovich A. S., Konoplianiuk I. A. (2022) Breakage Monitoring of Executive Body Cutters in Continuous Miner According to Mechanical Vibration Parameters. Part 2: Methodology for Creating a System for Mobile Monitoring of Cutter Breakages According to the Parameters of Mechanical Vibrations of the Gearbox with Natural Frequency. *Science and Technique*. 21 (2), 99–106. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-99-106> (in Russian)

Введение

Мониторинг технического состояния объектов по параметрам механических колебаний, в том числе собственных, можно отнести к одному из самых наукоемких направлений диагностики. Достаточно давно и широко он используется во многих сферах, включая такую ответственную, как авиационное [1–11]. Этот метод в полной мере может быть отнесен к неразрушающим способам контроля, эффективность которого обусловлена, прежде всего, высокой информативностью, наличием широкой номенклатуры серийно выпускаемых и постоянно совершенствующихся средств мониторинга, а также весьма развитой методической базой, включая нормативную документацию. Вместе с тем использование методов мониторинга, основанных на компьютеризированной обработке параметров колебаний для оценки технического состояния режущих инструментов в горных комбайнах, очень ограничено. Причина этого – наличие целого комплекса проблем, прежде всего обусловленных:

– наличием в приводных системах режущих органов горного комбайна достаточно сложных, содержащихся в редукторах цепочек паразитных шестерен, колебания которых проблематично выделить из параметров вибрации, регистрируемой на корпусах этих редукторов;

– высоким уровнем агрессивности среды и требований к взрывобезопасности.

Поэтому развитие исследований в области создания системы мобильного мониторинга технического состояния объектов горной техники по параметрам механических колебаний в основном осуществляется в направлении создания собственно средств мониторинга.

Цель исследований – разработка методических подходов к созданию системы мобильного мониторинга поломок резов режущих дисков горного комбайна «Универсал-600» по параметрам возникающих при этом механических колебаний с собственной частотой рукоятей двухпоточного редуктора привода исполнительного органа.

Методика создания системы мобильного мониторинга поломок резов

С учетом характера изменения глубины резания изменение квазистатической нагрузки на резец от его входа до выхода из породы может быть описано расчетной зависимостью, в графическом виде имеющей вид, близкий к половине синусоиды (рис. 1а). Учитывая одновременное взаимодействие с породой 30–40 % расположенных на режущем диске резов, создаваемая им расчетная суммарная квазистатическая нагрузка на привод близка к постоянной (рис. 1б, линия 1). Однако при поломке реза возникает относительно небольшое отклонение от постоянной нагруженности (рис. 1б, линия 2) и, более того, близкое к импульсному нагружение на режущий диск и на связанную с ним достаточно упруго податливую рукоять редуктора привода вращения режущих дисков, создаваемое при входе в породу следующего за поломанным реза. В результате этого возникают механические колебания этой рукояти с собственной частотой (~ 5 Гц), как было показано в первой части статьи, которые передаются на связанные с ней остальные элементы привода исполнительного органа.

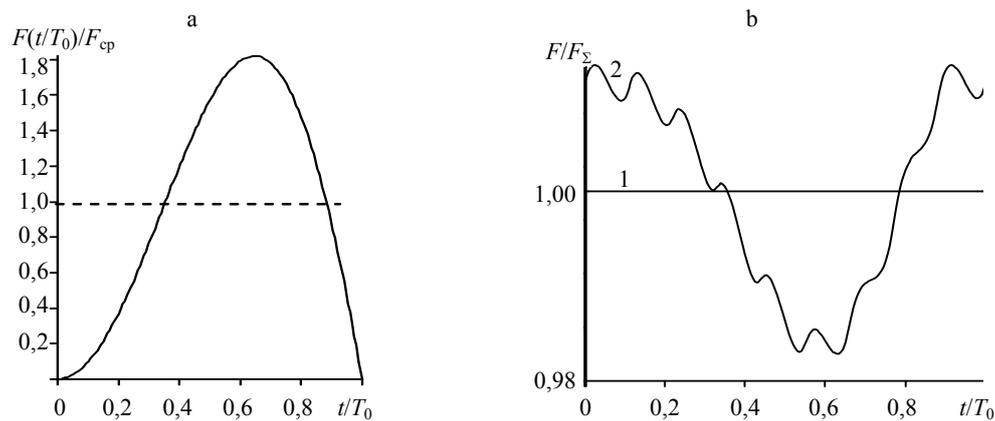


Рис. 1. Графики изменения относительной нагруженности реза от его входа до выхода из породы (а) и относительной суммарной окружной нагруженности режущего диска (б): 1 – при отсутствии поломок резцов; 2 – при поломке одного резца

Fig. 1. Graphs of changes in the relative loading of the cutter from its entrance to the exit from the rock (a) and the relative total circumferential loading of the cutting disc (b): 1 – in the absence of cutter breakage; 2 – when one cutter breaks

Для оценки возможности регистрации механических колебаний на невращающихся частях горного комбайна «Универсал-600» устанавливали датчики вибрации М/АС102-1А: на корпусах его редукторов – редуктора привода вращения исполнительного органа, входного редуктора, редукторов приводов бермовых фрез и отбойного устройства. Исследования проводили в условиях предприятия-изготовителя и эксплуатации.

На предприятии-изготовителе импульсное воздействие на резец осуществляли при вращении: только режущих дисков; только исполнительных органов; одновременно режущих дисков и исполнительных органов; поочередно, а затем одновременно всех приводных систем остальных режущих органов комбайна. Виброускорения регистрировали в течение 10–15 с.

В условиях эксплуатации исследования проводили сначала при полнокомплектной установке резцов на внешнем и внутреннем режущих дисках, затем поочередно на внешнем и внутреннем режущих дисках снимали один из резцов. В течение 30–40 с в реальном времени регистрировали параметры виброускорений. После этого определяли спектры виброускорений, строили осциллограммы колебаний, выделяли их амплитуды, осуществляя их анализ и обработку с привязкой к реальному времени.

Обработка результатов

Результаты исследований в условиях предприятия-изготовителя приведены в табл. 1 и на рис. 2. Их анализ показал следующее:

– механические колебания рукоятей двухпоточного редуктора привода вращения режущих дисков исполнительного органа с собственной частотой 5 Гц с большей или меньшей амплитудой были зарегистрированы практически на всех корпусах редукторов (привода вращения исполнительного органа, входного, бермовых фрез и отбойного устройства) в режиме работы всех приводов режущих органов горного комбайна, что подтвердило возможность их регистрации с его невращающихся частей при создании системы мониторинга поломок резцов на режущих дисках исполнительного органа;

– к наиболее удобным способам регистрации механических колебаний рукоятей двухпоточного редуктора привода вращения режущих дисков с собственной частотой 5 Гц с позиций отсутствия необходимости введения в измерительный тракт системы передачи сигнала с вращающихся частей комбайна можно отнести размещение датчика вибрации на упомянутом редукторе, где регистрируемые амплитуды колебаний с этой частотой являются преобладающими (рис. 2с, табл. 1) и существенно выделяются по частоте от ближайших в низкочастотном диапазоне колебаний, что позволяет использовать соответствующие стандартизованные низкочастотные третьоктавные фильтры и относительно недорогие компьютеризированные средства обработки диагностических данных.

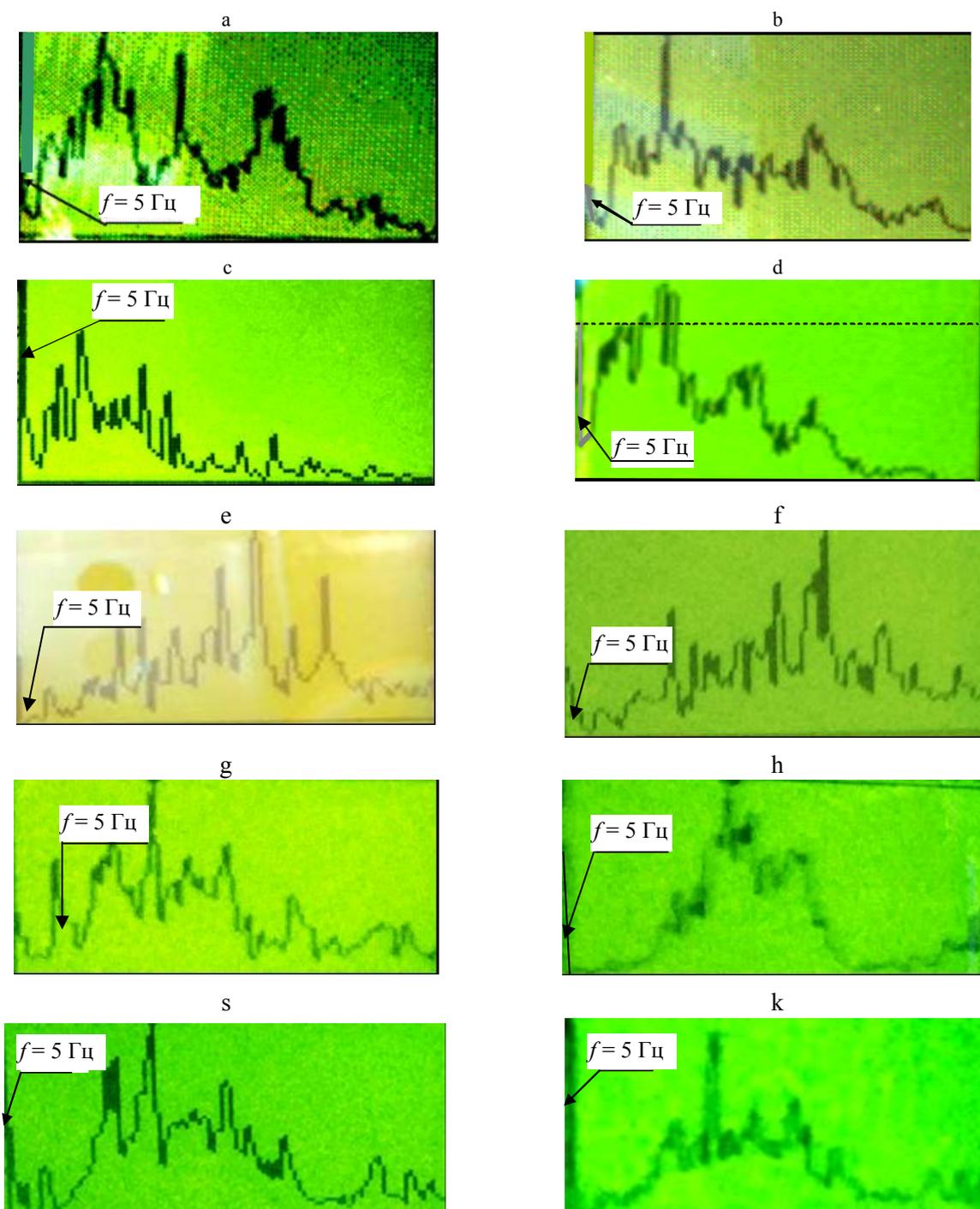


Рис. 2. Спектры вибрации, зарегистрированные: на корпусе редуктора привода вращения режущих дисков при вращении: а – только режущих дисков; б – только исполнительного органа; с – режущих дисков и исполнительного органа; на корпусе редуктора привода вращения исполнительного органа при вращении: d – только режущих дисков; e – только исполнительного органа; f – режущих дисков и исполнительного органа; на редукторе: g – бермовых фрез при его работе; h – отбойного устройства при его работе; на корпусе входного редуктора при работе: s – приводов всех режущих органов; k – только приводов исполнительных органов

Fig. 2. Vibration spectra recorded: on the gearbox housing of the rotation drive of the cutting discs during rotation: a – when only cutting discs rotate; b – when only executive body rotates; c – when cutting discs and executive body rotate; on the gearbox housing of the rotation drive of the executive body during rotation: d – when only cutting discs rotate; e – when only executive body rotates; f – when cutting discs and executive body rotate; on the gearbox: g – berm cutters during its operation; h – fender during its operation; on the input gearbox housing during the operation: s – drives of all cutting bodies; k – only drives of executive bodies

Таблица 1

Пять наиболее значимых по амплитуде частот, зарегистрированных виброметром «Агат-М» при исследовании колебаний основных компонентов горного комбайна «Универсал-600»
Five most significant frequencies in terms of amplitude registered by the “Agat-M” vibrometer in the study of vibrations of the main components of “Universal-600” mining machine

Амплитуда по значимости	Компонент горного комбайна					
	Зубчатый редуктор привода вращения режущих дисков. Вращение					
	РД* (рис. 2а)		ИО** (рис. 2б)		РД и ИО (рис. 2с)	
	Частота механических колебаний f , Гц	Виброускорение a , m/c^2	Частота механических колебаний f , Гц	Виброускорение a , m/c^2	Частота механических колебаний f , Гц	Виброускорение a , m/c^2
1	200	0,015	200	0,017	5	0,0024
2	195	0,014	195	0,0115	150	0,0017
3	390	0,014	240	0,0021	145	0,0014
4	210	0,0134	235	0,0070	100	0,0014
5	215	0,0133	575	0,0069	200	0,0013
	Редуктор привода вращения исполнительного органа. Вращение					
	РД (рис. 2д)		ИО (рис. 2е)		РД и ИО (рис. 2ф)	
	f , Гц	a , m/c^2	f , Гц	a , m/c^2	f , Гц	a , m/c^2
	1	215	0,0140	605	0,0060	600
2	205	0,0138	355	0,0055	595	0,0263
3	240	0,0135	300	0,0050	575	0,0258
4	245	0,0132	680	0,0050	490	0,0243
5	220	0,0125	705	0,0049	555	0,0236
	Редуктор бермовых фрез (рис. 2г)			Отбойное устройство (рис. 2h)		
	f , Гц	a , m/c^2	f , Гц	a , m/c^2	f , Гц	a , m/c^2
	1	320	0,0174	375	0,0339	0,0339
	2	225	0,0148	430	0,0314	0,0314
3	490	0,0126	425	0,0294	0,0294	
4	325	0,0122	405	0,0286	0,0286	
5	240	0,0122	385	0,0282	0,0282	
	Редуктор входной. Работа приводов					
	всех режущих органов (рис. 2s)			исполнительных органов (рис. 2k)		
	f , Гц	a , m/c^2	f , Гц	a , m/c^2	f , Гц	a , m/c^2
	1	330	0,0490	5	0,0514	
2	320	0,0320	330	0,0494		
3	245	0,0435	320	0,0410		
4	225	0,0407	330	0,0404		
5	330	0,0389	510	0,0319		

*РД – режущий диск.
 **ИО – исполнительный орган.

При обработке данных осциллограмм виброускорений (рис. 3), зарегистрированных в условиях эксплуатации режущих органов горного комбайна, определяли среднее значение амплитуд колебаний с частотой 5 Гц, их среднее квадратическое отклонение S и коэффициент вариации v . В осциллограммах колебаний с отсутствующим резцом выделяли и анализировали амплитудные значения, выходящие за диапазон $\pm 3S$, т. е. обусловленные

возросшим вдвое импульсным нагружением рукояти.

В процессе проверки однородности дисперсий, которую осуществляли с использованием критерия Кохрена при 5%-й доверительной вероятности, получили значение $G = 0,4777 < 0,5466$, что подтвердило их однородность и позволило оценить статистическую значимость различия средних значений амплитуд при доверительной вероятности 0,95.

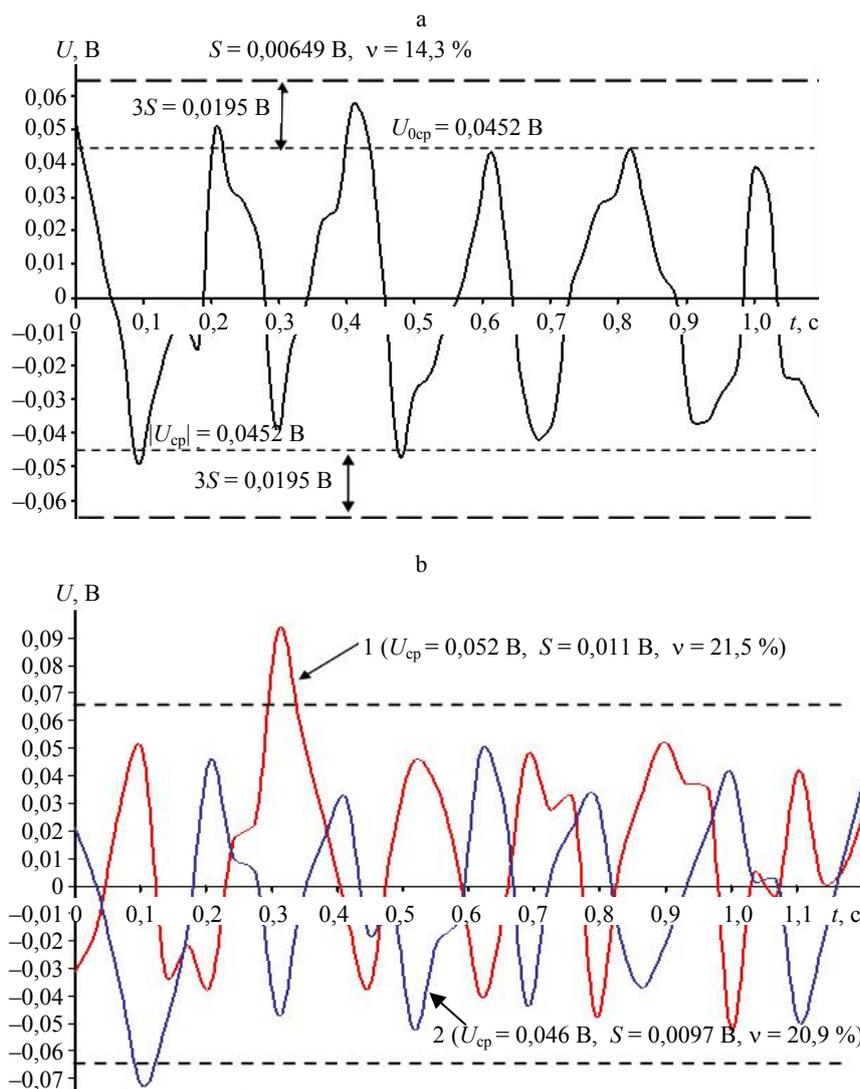


Рис. 3. Типовые участки осциллограмм механических колебаний с частотой 5 Гц при: а – полном комплекте резцов на режущих дисках; б – отсутствии одного резца на наружном 1 и внутреннем 2 режущих дисках

Fig. 3. Typical sections of oscillograms of mechanical vibrations with a frequency of 5 Hz at: a – complete set of cutters on cutting discs; b – absence of one cutter on outer 1 and inner 2 cutting discs

Анализ полученных результатов показал следующее:

– различия между средними значениями амплитуд механических колебаний с частотой 5 Гц рукоятей зубчатого редуктора двухпоточного привода вращения режущих дисков исполнительного органа, зарегистрированных при полном комплекте резцов на режущих дисках и отсутствии одного резца на одном из них, статистически незначимы. Это не позволяет использовать средние значения амплитуд данных колебаний для мониторинга поломок резцов,

что хорошо коррелирует с результатами ранее проведенных теоретических исследований;

– при отсутствии резца одна из амплитуд механических колебаний с частотой 5 Гц, зарегистрированная за оборот режущего диска, превышает утроенное среднее квадратическое отклонение амплитуд колебаний с частотой 5 Гц, что позволяет использовать этот фактор для своевременного выявления поломок резцов и создания системы мобильного автоматизированного мониторинга поломок резцов на режущих дисках горного комбайна.

С учетом результатов исследований в основу методических подходов к созданию системы мобильного автоматизированного мониторинга поломок резцов режущего диска горного комбайна «Универсал-600» по параметрам возникающих при этом механических колебаний с собственной частотой 5 Гц рукоятей двухпоточного редуктора привода вращения режущих дисков исполнительного органа может быть отмечено следующее:

– средства мониторинга должны обеспечивать регистрацию колебаний в третьоктавном диапазоне со срединной частотой 5 Гц, частотой дискретизации регистрируемого сигнала не менее 50 Гц и объемом регистрируемой в виде файла диагностической информации за 10–12 оборотов режущего диска;

– средства обработки зарегистрированных данных должны обеспечить выделение амплитуд колебаний с частотой 5 Гц, расчет их среднего значения и среднего квадратического отклонения и определение отклонения выделенных амплитуд виброускорений от среднего значения с оповещением оператора о поломках резцов при величине этого отклонения более трех квадратических отклонений.

ВЫВОД

В результате анализа результатов исследований установлено, что механические колебания рукоятей двухпоточного редуктора привода исполнительного органа с собственной частотой 5 Гц передаются практически на все корпуса невращающихся редукторов привода и могут быть выделены при всех режимах их работы, что подтверждает возможность регистрации этих колебаний при мониторинге поломок резцов на режущих дисках исполнительного органа. Вместе с тем их регистрация наиболее удобна на зубчатом двухпоточном редукторе привода исполнительного органа, где регистрируемые амплитуды колебаний с этой частотой являются преобладающими и существенно выделяются по частоте от ближайших в низкочастотном диапазоне колебаний, что позволяет использовать соответствующие стандартизованные низкочастотные третьоктавные филь-

тры и относительно недорогие компьютеризированные средства обработки диагностических данных. При этом могут быть применены средства мониторинга, обеспечивающие регистрацию колебаний в третьоктавном диапазоне со срединной частотой 5 Гц, частотой дискретизации регистрируемого сигнала не менее 50 Гц и объемом регистрируемой в виде файла диагностической информации за 10–12 оборотов режущего диска, а также средства обработки зарегистрированных данных, позволяющие выделить амплитуды колебаний с частотой 5 Гц, выполнить расчет их среднего значения и среднего квадратического отклонения и определить отклонения выделенных амплитуд виброускорений от их среднего значения с оповещением оператора о поломках резцов при величине этого отклонения более трех квадратических отклонений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы проектирования композиционных динамически подобных моделей агрегатов самолетов [Электронный ресурс] / А. М. Азаров [и др.] // Учебные записки ЦАГИ. 2006. № 4. С. 42–54.
2. Влияние системы упругого вывешивания на точность результатов модальных испытаний летательных аппаратов / В. А. Бернс [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 1. С. 18–27. <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-1-18-27>.
3. Зимин, В. Н. Разработка методов анализа динамики и оценки работоспособности раскрывающихся крупногабаритных космических конструкций ферменного типа / В. Н. Зимин. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 309 с.
4. Киселев, Ю. В. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники [Электронный ресурс] / Ю. В. Киселев, Д. Ю. Киселев, С. Н. Тиц. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С. П. Королева, 2012. Режим доступа: <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Vibracionnaya-dagnostika-sistem-i-konstrukcii-aviacionnoi-tehniki-Elektronnyi-resurs-uchebnik-54417>.
5. Неразрушающий контроль: справочник / А. В. Барков [и др.]. М.: Машиностроение, 2005. Т. 7. Кн. 2. Вибродиагностика. 829 с.
6. Кобяков, И. Б. Векторная виброметрия – технология XXI века / И. Б. Кобяков, Д. В. Малютин, А. А. Сперанский // Датчики и системы. 2006. № 1. С. 2–7.
7. Косицын, А. В. Метод вибродиагностики дефектов упругих конструкций на основе анализа собственных форм колебаний / А. В. Косицын // Приборы и методы измерений. 2011. Т. 3, № 2. С. 129–135.

8. Вибрационный способ диагностики начала процесса разрушения в элементах конструкции объекта: пат. 2284518 Рос. Федерации, МПК G01N29/04, G01M7/00 / М. В. Нариманов, Т. В. Нариманов. Оpubл. 27.09.2006.
9. Способ определения параметров собственных тонов колебаний конструкций в резонансных испытаниях: пат. 2658125 Рос. Федерации, МПК G01M7/00 / В. А. Бернс, Е. П. Жуков, В. В. Маленкова. Оpubл. 19.06.2018.
10. Идентификация дефектов летательных аппаратов по параметрам вибраций в процессе эксплуатации / В. А. Бернс [и др.] // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. Т. 27, № 2. С. 24–42. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2015-2-24-42>.
11. Опыт контроля дефектов летательных аппаратов по параметрам вибраций / В. А. Бернс [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 4. С. 86–96.

Поступила 02.11.2021

Подписана в печать 10.01.2022

Опубликована онлайн 31.03.2022

REFERENCES

1. Azarov A. M., Zichenkov M. Ch., Ishmuratov F. Z., Chedrik V. V. (2006) Methods for Designing Composite Dynamically Similar Models of Aircraft Units. *Uchenye Zapiski TsAGI* [Study notes of Central Aerohydrodynamic Institute], (4), 42–54 (in Russian).
2. Berns V. A., Dolgoplov A. V., Zhukov E. P., Marinin D. A. (2016) Influence of the Elastic Suspension System on the Accuracy of the Results of Modal Tests of Aircraft. *Vestnik Samarskogo Universiteta. Aerokosmicheskaya Tekhnika, Tekhnologii i Mashinostroenie = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 15 (1), 18–27. <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-1-18-27> (in Russian).
3. Zimin V. N. (2008) *Development of Methods for Analyzing Dynamics and Evaluating the Performance of Large-Size Expanding Space Structures of a Truss Type*. Moscow, Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University. 309 (in Russian).
4. Kiselev Yu. V., Kiselev D. Yu., Tits S. N. (2012) *Vibration Diagnostics of Systems and Structures of Aviation Equipment*. Samara: Publishing House of the Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolev. Available at: <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Vibracionnaya-dagnostika-sistem-i-konstrukcii-aviacionnoi-tehniki-Elektronnyi-resurs-uchebnik-54417>.
5. Barkov A. V., Barkova N. A., Vasil'eva R. V., Gol'din A. S., Zusman A. V., Sokolova A. G., Shirman A. R., Yakubovich V. A. (2005) *Non-Destructive Testing: Reference Book. Vol. 7. Book 2. Vibration Diagnostics*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 829 (in Russian).
6. Kobayakov I. B., Malyutin D. V., Speransky A. A. (2006) Vector Vibrometry – Technology of the XXI Century. *Datchiki i Sistemi = Sensors & Systems*, (1), 2–7 (in Russian).
7. Kositsyn A. V. (2011) Method of Vibration Diagnostics of Defects in Elastic Structures Based on the Analysis of Natural Vibration Modes. *Pribory i Metody Izmereniy = Devices and Methods of Measurements*, 3 (2), 129–135 (in Russian).
8. Narimanov M. V., Narimanov T. V. (2006) *Vibration Method for Diagnostics of the Beginning of the Destruction Process in the Structural Elements of the Object*. Patent of Russian Federation No 2284518 (in Russian).
9. Burns V. A., Zhukov E. P., Malenкова V. V. (2018) *Method for Determining the Parameters of Natural Tones of Structure Vibrations in Resonance Tests*. Patent of Russian Federation No 2658125 (in Russian).
10. Burns V. A., Lysenko E. A., Marinin D. A., Dolgoplov A. V., Zhukov E. P. (2015) Aircraft Defect Identification by Vibration Parameters in Operation. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 27 (2), 24–42. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2015-2-24-42> (in Russian).
11. Burns V. A., Lysenko E. A., Dolgoplov A. V., Zhukov E. P. (2016) Experience in Controlling Aircraft Defects by Vibration Parameters. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiiskoi Akademii Nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 18 (4), 86–96 (in Russian).

Received: 02.11.2021

Accepted: 10.01.2022

Published online: 31.03.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113>

УДК 662.668

Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA

Магистранты В. А. Ермакова¹⁾, Е. В. Гасперович¹⁾,
канд. техн. наук, доц. А. И. Ермаков¹⁾,
докт. техн. наук, доц. В. В. Литвяк²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и крахмалосодержащего сырья – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха» (Московская область, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В современном машиностроении, наряду со снижением металлоемкости конструкций, главной задачей является повышение надежности и долговечности деталей, узлов механизмов. Эта проблема никогда не утрачивает своей актуальности в связи с постоянно возрастающими требованиями к изготовлению изделий, с необходимостью экономии дефицитных дорогостоящих металлов и сплавов и, как следствие, замены их на экономически более выгодные варианты. Один из самых перспективных, с точки зрения экологии, способов замены металлов – использование в конструкциях узлов пластиков, в частности полимолочной кислоты (PLA). PLA – это биоразлагаемый термопластик, применяемый в 3D-печати. В статье представлены результаты экспериментального исследования на разрыв образцов, полученных методом 3D-печати из PLA при различных технологических режимах работы 3D-принтера. В качестве варьируемых параметров были выбраны: форма заполнения образцов (треугольник, шестигранник (соты), линия, ребро), температура сопла (190–205 °С), коэффициент заполнения образца (от 10 до 40 %). Испытания образцов на разрыв проводили на гидравлической разрывной машине с измерительным программным комплексом в комплекте Kason WDW-5. При выполнении испытаний основным выходным показателем считали условный предел текучести. Анализ экспериментальных данных показал существенное влияние изучаемых технологических параметров на условный предел текучести, который изменялся от 16,50 до 22,42 МПа. В процессе исследований определены наиболее рациональные формы и коэффициент заполнения образцов, а также температура сопла при печати PLA.

Ключевые слова: 3D-печать, PLA, технологические режимы, механические характеристики, условный предел текучести, форма заполнения, коэффициент заполнения, температура печати

Для цитирования: Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA / В. А. Ермакова [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 107–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113>

Study of Strength Characteristics of Products Produced by 3D-Printing from PLA

V. A. Ermakova¹⁾, E. V. Gasperovich¹⁾, A. I. Ermakov¹⁾, V. V. Litvyak²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾All-Russian Research Institute of Starch and Starch-Containing Raw Materials Processing – Branch of Russian Potato Research Centre (Moscow Region, Russian Federation)

Abstract. In modern mechanical engineering, along with reducing the metal consumption of structures, the main task is to increase the reliability and durability of parts, assemblies of mechanisms. This problem never loses its relevance due

Адрес для переписки

Ермаков Алексей Игоревич
Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 67,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-05
ermakov@bntu.by

Address for correspondence

Ermakov Aleksey I.
Belarusian National Technical University
67, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-05
ermakov@bntu.by

to the ever-increasing requirements for manufacture of products, with the need to save scarce expensive metals and alloys and, as a result, replace them with economically more profitable options. One of the most promising, from the point of view of ecology, ways to replace metals, is to use in the construction of plastic assemblies, in particular polylactic acid (PLA). PLA is a biodegradable thermoplastic used in 3D-printing. The paper presents results of an experimental study on the rupture of samples obtained by 3D-printing from PLA under various technological operating modes of 3D-printer. The following parameters have been chosen as variable parameters: the form of filling samples (triangle, hexagon (honeycomb), line, edge), nozzle temperature (190–205 °C), sample filling factor (from 10 up to 40 %). Tensile testing of the samples have been carried out on a hydraulic tensile machine with a measuring software package in the Kason WDW-5 set. When performing tests, the conditional yield strength was considered the main output indicator. The analysis of experimental data has shown a significant effect of the investigated technological parameters on the conventional yield point, which varied from 16.5 to 22.42 MPa. The most rational forms and sample filling factor, as well as the temperature of nozzle when printing with PLA, have been determined.

Keywords: 3D-printing, PLA, technological modes, mechanical characteristics, conditional yield stress, filling form, filling factor, printing temperature

For citation: Ermakova V. A., Gasperovich E. V., Ermakov A. I., Litvyak V. V. (2022) Study of Strength Characteristics of Products Produced by 3D-Printing from PLA. *Science and Technique*. 21 (2), 107–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113> (in Russian)

Введение

Основная задача современного машиностроения – повышение надежности и долговечности деталей и узлов механизмов наряду со снижением металлоемкости конструкций. Актуальность проблемы постоянно возрастает в связи с повышением требований к изготовлению изделий, необходимостью экономии дефицитных дорогостоящих металлов и сплавов и, как следствие, замены их на экономически более выгодные варианты [1, 2]. Одним из перспективных, с точки зрения экологии, способов замены металлов является использование в конструкциях узлов пластиков, в частности полимолочной кислоты (PLA) [3, 4]. PLA – биоразлагаемый термопластик, применяемый в 3D-печати [5].

Однако, несмотря на широкое распространение 3D-печати пластиком, в открытой печати недостаточно полно представлены данные об исследованиях механических характеристик изготавливаемых изделий, о влиянии комплекса режимных параметров печати на эти характеристики. В связи с чем невозможно спрогнозировать физические свойства конечной продукции [6–10]. Поэтому экспериментальные исследования влияния режимных параметров 3D-печати пластиком на механические характеристики изделий актуальны и представляют научный и практический интерес [11].

Материалы и методы исследований

В ходе экспериментов использовали общие методы научного познания:

1) теоретические – анализ и синтез информации по теме исследования; методы матема-

тического моделирования при анализе результатов эксперимента;

2) эмпирические – планирование эксперимента; 3D-моделирование образцов и их изготовление на 3D-принтере с поддержанием требуемых технологических параметров; проведение испытаний полученных образцов на разрывной машине.

На основе анализа литературных источников по теме исследования [1–3, 6–11] выделены основные факторы, влияющие на механические характеристики изделий, изготавливаемых методом 3D-печати: форма заполнения и коэффициент заполнения образцов, температура сопла. На первом этапе изучали влияние формы заполнения образцов на их механические характеристики. В качестве форм заполнения выбраны треугольник, шестигранник (соты), линия, ребро. Формы варьирования определяли на основе изучения возможных вариантов печати 3D-принтера Flashforge Guider II. Остальные параметры печати на первом этапе поддерживались постоянными и имели следующие значения: температура сопла 205 °C, коэффициент заполнения образца 20 %, температура нагревательного столика 55 °C, скорость печати 60 мм/с.

3D-моделирование образцов проводили в программе SolidWorks. Размеры образца указаны на рис. 1 (толщина образца 4 мм).

3D-модели образцов обрабатывали в программе-слайсере FlashPrint, позволяющей задать требуемые параметры изготовления. Модели создания образцов с различными формами заполнения в программе FlashPrint представлены на рис. 2.

Соотношение времени печати к количеству затрачиваемого на образцы пластика на первом этапе экспериментальных исследований представлено в табл. 1.

Образцы для проведения исследований изготавливали в трех экземплярах. На рис. 3 показан процесс печати образцов на 3D-принтере Flashforge Guider II.

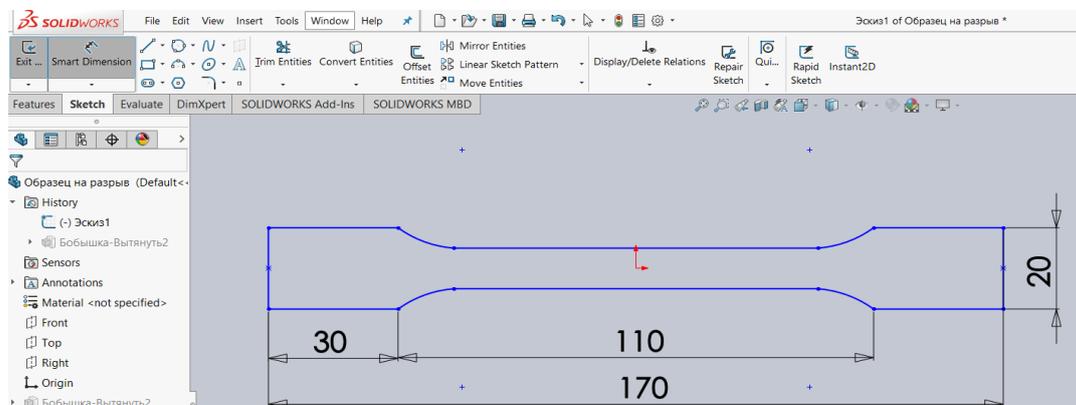


Рис. 1. Эскиз образца для испытаний на разрыв

Fig. 1. Tensile test sample sketch

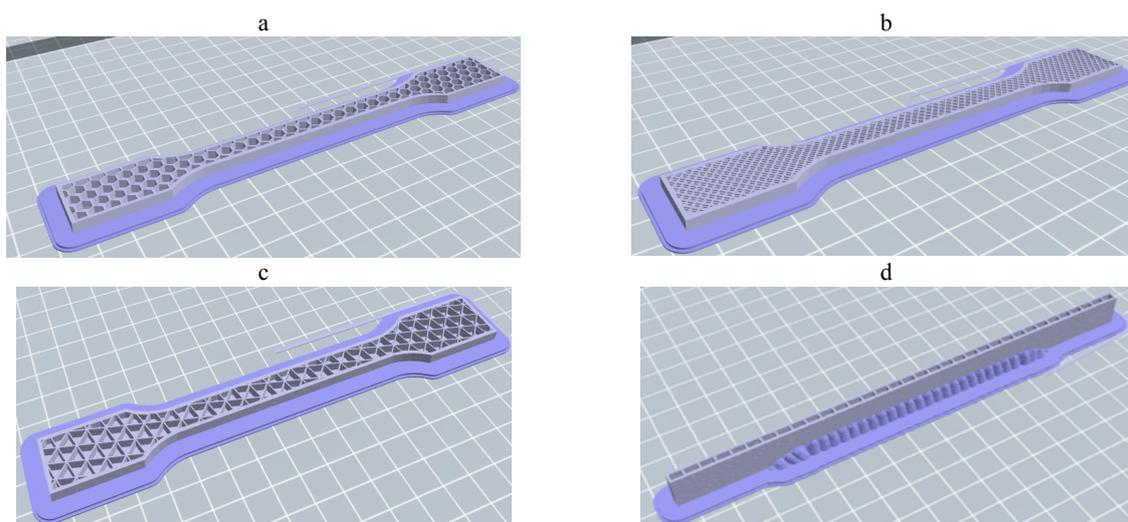


Рис. 2. Модели создания образцов с различными формами заполнения: а – шестигранниками (сотами); б – линиями; с – треугольниками; д – печатью линий на ребре

Fig. 2. Models for creating samples with various filling forms: a – hexagon (honeycomb); b – lines; c – triangles; d – printing of lines on edge

Таблица 1

Соотношение времени печати к количеству затрачиваемого на образцы пластика
Ratio of printing time to amount of plastic spent on samples

Форма заполнения образца	С подложкой		Без подложки	
	Время печати, мин	Расход пластика, м	Время печати, мин	Расход пластика, м
Треугольник	41,00	3,89	29	2,37
Шестигранник (соты)	41,00	3,84	29	2,32
Линия	39,00	3,82	28	2,30
Ребро	1,16	4,89	39	2,71

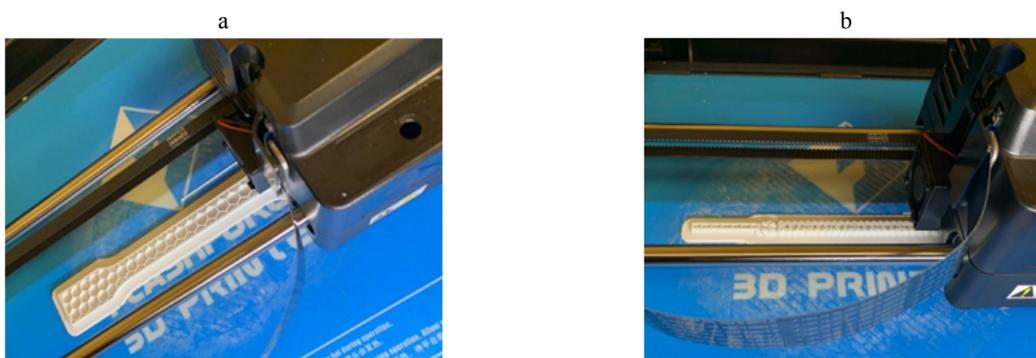


Рис. 3. Процесс печати образцов на 3D-принтере Flashforge Guider II:
а – с шестигранниками; б – с линиями на ребре

Fig. 3. Process of printing samples on 3D printer Flashforge Guider II:
a – with hexagon; b – with lines on edge

Анализ результатов исследований первого этапа экспериментов позволил определить наиболее рациональную форму заполнения образцов с точки зрения их прочности на разрыв, времени печати и расхода материала.

На втором этапе изучали влияние температуры сопла (190; 195; 200; 205 °С) и коэффициента заполнения образцов (10; 20; 30; 40 %) на их механические характеристики. Остальные параметры печати на втором этапе поддерживались постоянными: форма заполнения образца – шестигранник, температура нагревательного столика 55 °С, скорость печати 60 мм/с. Интервал варьирования температуры был обусловлен рекомендациями производителя Bestfilament для данного вида пластика. Коэффициент заполнения образца также существенно влияет на прочность изделий. Но печать образцов с коэффициентом заполнения 50 % и более ведет к значительному увеличению стоимости и времени их изготовления.

Для изготовления образцов на всех этапах экспериментальных исследований использовали филамент для 3D-печати Bestfilament, материал – PLA, диаметр филамента 1,75 мм, цвет белый.

Испытания образцов на разрыв проводили на гидравлической разрывной машине с измерительным программным комплексом в комплекте Kason WDW-5, где образцы подвергались растягивающим усилиям до разрушения.

Прочность образцов при растяжении определяли согласно ГОСТ 11262–80 [12]. Перед испытаниями измеряли ширину и толщину образцов в рабочей части в трех местах (с точностью до 0,01 мм) и вычисляли площадь поперечного сечения: в расчет принимали наименьшее ее

значение. Перед испытаниями на образцы (без их повреждения) наносили необходимые метки, ограничивающие их базу и положение кромок захватов. Образцы закрепляли в зажимах испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов, таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и с направлением движения подвижного зажима. Зажимы затягивали равномерно, чтобы не было проскальзывания образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушение в месте закрепления. Затем образцы нагружали возрастающей нагрузкой, скорость раздвижения зажимов составила 5 мм/мин при определении прочности и относительного остаточного удлинения. В момент разрушения фиксировали усилие. Испытания проводили при температуре (23 ± 2) °С. Выходные характеристики определяли по графику «нагрузка – удлинение» [12]; при испытаниях основным показателем был условный предел текучести $\sigma_{рту}$.

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе экспериментальных исследований при проведении испытания на разрыв образцы, напечатанные на ребре, показали самый высокий результат, что отражено в табл. 2.

Однако при печати на ребре пластика было затрачено на 15–20 % больше, а время печати увеличилось на 25–30 % по сравнению с остальными формами заполнения (табл. 1). Наименьшее значение условного предела текучести оказалось у образцов с формой заполне-

ния линия $\Sigma\sigma_{\text{рту}} = 16,50$ МПа, т. е. применение данной формы заполнения при печати изделий нежелательно.

Таблица 2

Прочностные характеристики исследуемых образцов при испытании на разрыв

Strength characteristics of studied samples in tensile test

Образец		Условный предел текучести $\sigma_{\text{рту}}$, МПа	Среднее значение $\Sigma\sigma_{\text{рту}}$
Форма заполнения	№ п/п		
Треугольник	1	17,75	18,42
	2	18,50	
	3	19,00	
Шестигранник	1	19,00	18,25
	2	17,75	
	3	18,00	
Линия	1	16,75	16,50
	2	17,50	
	3	15,25	
Ребро	1	24,00	22,42
	2	19,25	
	3	24,00	

Для образцов с формой заполнения треугольник и шестигранник показатели по среднему значению условного предела текучести оказались схожими – отклонение не превышало 1,5 %. При этом время печати и количество затраченного пластика (табл. 1) также одинаковы. Таким образом, из анализа данных табл. 1 и 2 можно сделать вывод, что наиболее рациональными формами заполнения образцов при 3D-печати, с точки зрения их прочности на разрыв, времени печати и расхода материала, являются треугольник и шестигранник.

Результаты второго этапа экспериментальных исследований представлены в табл. 3.

Графические зависимости изменения условного предела текучести от коэффициента заполнения образца и температуры сопла представлены на рис. 4, 5.

Из рис. 4 видно, что с ростом коэффициента заполнения образца условный предел текучести $\sigma_{\text{рту}}$ увеличивается, причем линейно: при росте коэффициента заполнения на 30 % (с 10 до 40 %) $\sigma_{\text{рту}}$ увеличивается на 9,6 %, или на 1,92 МПа. В то же время зависимость $\sigma_{\text{рту}}$ от температуры сопла (рис. 5) имеет явно выраженный экстремум, что может быть обусловлено ухудшением адгезии при выходе за пределы оптимальных параметров печати [13–16].

Результаты второго этапа экспериментальных исследований
Results of the second stage of experimental research

Температура сопла, °С	Среднее значение $\sigma_{\text{рту}}$, МПа, при коэффициенте заполнения, %			
	10	20	30	40
190	16,77	18,41	18,99	20,14
195	18,64	19,28	19,37	19,91
200	18,10	19,15	19,58	20,02
205	17,42	18,38	20,83	21,41

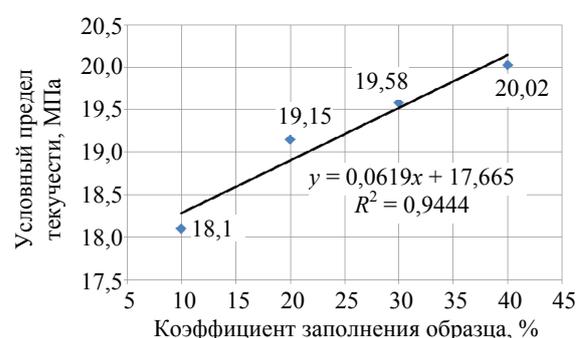


Рис. 4. Зависимость изменения условного предела текучести $\sigma_{\text{рту}}$ от коэффициента заполнения образца при постоянной температуре сопла 200 °С

Fig. 4. Dependence of conditional yield strength $\sigma_{\text{рту}}$ change on sample filling factor at constant nozzle temperature of 200 °С

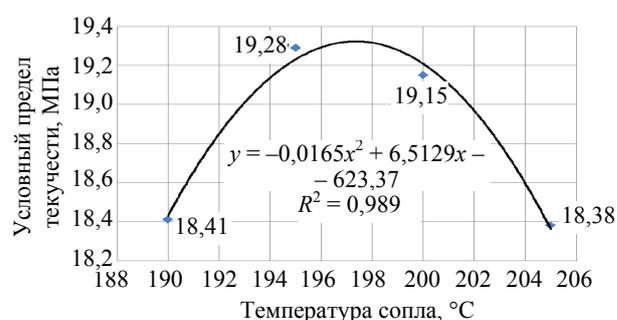


Рис. 5. Зависимость изменения условного предела текучести $\sigma_{\text{рту}}$ от температуры сопла при постоянном коэффициенте заполнения образца 20 %

Fig. 5. Dependence of conditional yield strength $\sigma_{\text{рту}}$ change on nozzle temperature at constant sample filling factor of 20 %

Минимальные значения условного предела текучести наблюдаются при температурах сопла 190 и 205 °С, а максимум достигается в интервале 195–200 °С. Варьирование температуры сопла позволяет увеличить прочностные характеристики образца на 5 %.

ВЫВОДЫ

1. Согласно анализу экспериментальных данных образцов, полученных методом 3D-печати из PLA:

- форма заполнения образцов существенно влияет на их механические характеристики: условный предел текучести может изменяться от минимального ($\sigma_{\text{рту}} = 16,50$ МПа, форма заполнения – линия) до максимального 22,42 МПа (печать на ребре);

- наиболее рациональными формами заполнения образцов при 3D-печати, с точки зрения их прочности на разрыв, времени печати и расхода материала, являются треугольник и шестигранник;

- влияние коэффициента заполнения образцов в пределах варьирования 10–40 % на условный предел текучести носит линейный характер, при этом с ростом коэффициента заполнения с 10 до 40 % $\sigma_{\text{рту}}$ увеличивается на 9,6 %, или на 1,92 МПа;

- зависимость условного предела текучести от изменения температуры сопла в пределах температур 190–205 °С имеет явно выраженный экстремум, достигающий максимума в интервале 195–200 °С, значение условного предела текучести в данном диапазоне на 5 % больше, чем в крайних точках интервала варьирования.

2. Полученные в процессе испытаний данные могут быть использованы для углубления и корректировки существующих теоретических моделей, описывающих процессы 3D-печати, а также в промышленности при проектировании изделий, производимых методом 3D-печати из PLA.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутьлина. СПб.: Изд-во политех. ун-та, 2013. 222 с.
2. Савченя, А. А. Исследование влияния технологических параметров 3D-печати PLA-пластиком на механические характеристики изделий / А. А. Савченя, А. И. Ермаков // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 16-го Междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 18-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», 26 марта 2020 г. Минск: Право и экономика, 2020. С. 231–232.
3. Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы) / В. А. Валетов. СПб.: Ун-т ИТМО, 2015. 63 с.

4. Малевич, Д. М. Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь / Д. М. Малевич // Стратегические направления социально-экономического и финансового обеспечения развития национальной экономики: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 27–28 сент. 2018 г. / редкол. В. В. Пузиков [и др.]. Минск, 2018. С. 275–276.
5. Ермаков, А. И. Утилизация тары и упаковки / А. И. Ермаков. Минск: БНТУ, 2017. 194 с.
6. Experimental Determination and Comparative Analysis of the PPH030GP, ABS and PLA Polymer Strength Characteristics at Different Strain Rates / M. Yu. Zalohin [et al.] // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 3. С. 233–239. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239>.
7. Cantrell, J. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts / J. Cantrell // Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Proceedings of the 2016 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics. 2016. No 3. P. 89–105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_11.
8. Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D-Printed Objects / T. Galeta [et al.] // Procedia Engineering. 2016. No 149. P. 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.644>.
9. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D-Printed ABS with Respect to Layer Thickness and Orientation / B. Rankouhi [et al.] // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2016. Vol. 3, No 16. P. 467–481. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2>.
10. Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment / O. A. Mohamed [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. 2016. Vol. 25, No 7. P. 2922–2935. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2157-6>.
11. Технология аддитивного производства, моделирование и управление качеством процесса послыого синтеза / А. В. Чабаненко [и др.]. СПб.: ГУАП, 2018. 137 с.
12. Пластмассы. Метод испытания на растяжение (с Изменением № 1): ГОСТ 11262–80. Введ. 01.12.1980. М.: Госстандарт СССР, 1980. 8 с.
13. Третьякова, А. А. Кукуруза как основное сырье для производства PLA-пластика / А. А. Третьякова, В. А. Ермакова, А. И. Ермаков // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 25–26 марта 2021. Минск: БГАТУ, 2021. С. 74–76.
14. Третьякова, А. А. Влияние температурных режимов 3D-печати на характеристики изделия / А. А. Третьякова, А. И. Ермаков // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 17-го Междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 19-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», 25–26 марта 2021 г. Минск: Право и экономика, 2021. 213 с.
15. Ермаков, А. И. Применение 3D-печати в кондитерском производстве / А. И. Ермаков, С. В. Чайко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. 70-й Науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов. БНТУ: в 4 т. Минск: БНТУ, 2017. Т. 4. С. 503.
16. Разработка 3D-принтера для образовательных учреждений / А. И. Ермаков [и др.] // Переработка и управ-

ление качеством сельскохозяйственной продукции: сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 23–24 марта 2017 г. / редкол. В. Я. Груданов [и др.]. Минск: БГАТУ, 2017. С. 426–428.

Поступила 14.10.2021

Подписана в печать 15.12.2021

Опубликована онлайн 31.03.2022

REFERENCES

- Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutylyna I. N. (2013) *Additive Technologies in Mechanical Engineering*. Saint-Petersburg, Publishing House of Polytechnical University. 222 (in Russian).
- Savchenya A. A., Ermakov A. I. (2020) Study of the Influence of Technological Parameters of 3D-Printing with PLA Plastic on the Mechanical Characteristics of Products. *Mirovaya Ekonomika i Biznesadministririvanie Malykh i Srednikh Predpriyatii: Materialy 16-go Mezhdunar. Nauch. Seminara, Provodimogo v Ramkakh 18-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. "Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike"*, 26 Marta 2020 [World Economy and Business Administration of Small and Medium Enterprises: Proceedings of 16th International Scientific Workshop Held Within the Framework 18th International Scientific and Technical Conference "Science for Education, Production, Economy", Minsk, March 26, 2020]. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ., 231–232 (in Russian).
- Valetov V. A. (2015) *Additive Technologies (State and Prospects)*. Saint-Petersburg, Publishing House of ITMO University. 63 (in Russian).
- Malevich D. M. (2018) Prospects for Development of Additive Technologies in the Republic of Belarus. *Strategicheskie Napravleniya Sotsial'no-Ekonomicheskogo i Finansovogo Obespecheniya Razvitiya Natsional'noi Ekonomiki: Materialy II Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Minsk, 27–28 Sent. 2018 g.* [Strategic Directions of Socio-Economic and Financial Support for Development of National Economy: Proceedings of 2nd International Scientific and Practical Conference, Minsk, Sept. 27–28, 2018]. Minsk, 275–276 (in Russian).
- Ermakov A. I. (2017) *Disposal of Containers and Packaging*. Minsk, Belarusian National Technical University. 194 (in Russian).
- Zalohin M. Yu., Skliarov V. V., Dovzhenko J. S., Brega D. A. (2019) Experimental Determination and Comparative Analysis of the PPH030GP, ABS and PLA Polymer Strength Characteristics at Different Strain Rates. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 18 (3), 233–239. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239>.
- Cantrell J. (2016) Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Proceedings of the 2016 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, (3), 89–105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_11.
- Galeta T., Raos P., Stojšić J., Pakši I. (2016) Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D-Printed Objects. *Procedia Engineering*, 149, 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.644>.
- Rankouhi B., Javadpour S., Delfanian F., Letcher T. (2016) Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D-Printed ABS with Respect to Layer Thickness and Orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 3 (16), 467–481. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2>.
- Mohamed O. A., Masood S. H., Bhowmik J. L., Nikzad M., Azadmanjiri J. (2016) Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25 (7), 2922–2935. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2157-6>.
- Chabanenko A. V., Nazarevich S. A., Shchenikov Ya. A., Gulevitskii A. Yu. (2018) *Additive Manufacturing Technology, Modeling and Quality Control of the Layer-by-Layer Synthesis Process*. Saint-Petersburg, Publishing House of State University of Aerospace Instrumentation. 137 (in Russian).
- State Standard 11262–80. *Plastics. Tensile Test Method (as Amended by Change No 1)*. Moscow, Gosstandart Publ., 1980. 8 (in Russian).
- Tretyakova A. A., Ermakova V. A., Ermakov A. I. (2021) Corn as the Main Rawmaterial for the Production of PLA Plastic. *Pererabotka i Upravlenie Kachestvom Sel'skokhozyaistvennoi Produktsii: Materialy 5-i Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Minsk, 25–26 Marta 2021* [Processing and Management of Quality of Agricultural Products: Proceedings of 5th International Scientific and Practical Conference, Minsk, March 25–26, 2021]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 74–76 (in Russian).
- Tretyakova A. A., Ermakov A. I. (2021) Influence of Temperature Conditions of 3D-Printing on Product Characteristics. *Mirovaya Ekonomika i Biznes-Administririvanie Malykh i Srednikh Predpriyatii: Materialy 17-go Mezhdunar. Nauch. Seminara, Provodimogo v Ramkakh 19-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. "Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike"*, 25–26 Marta 2021g. [World Economy and Business Administration of Small and Medium Enterprises: Proceedings 17th International Scientific Workshop Held Within the Framework 19th International Scientific and Technical Conference "Science for Education, Production, Economy", Minsk, March 25–26, 2021]. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 213 (in Russian).
- Ermakov A. I., Chaiko S. V. (2017) Use of 3D-Printing in the Confectionery Industry. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 15-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. 70-i Nauch.-Tekhn. Konf. Prof.-Prepod. Sostava, Nauch. Rabotnikov, Doktorantov i Aspir. BNTU. T. 4* [Science for Education, Production, Economy: Proceedings of 15th International Scientific and Technical Conference, 70th Scientific and Technical Conference of Teaching Staff, Researchers, Doctoral Students and Postgraduates of BNTU. Vol. 4]. Minsk, Belarusian National Technical University, 503 (in Russian).
- Ermakov A. I., Kniga V. V., Meleshchenya E. P., Tretyakova A. A. (2017) Development of 3D-Printer for Educational Institutions. *Pererabotka i Upravlenie Kachestvom Sel'skokhozyaistvennoi Produktsii: Sb. St. III Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Minsk, 23–24 Marta 2017 g.* [Processing and Management of Quality of Agricultural Products: Collecte Dpapers of III International Scientific and Practical Conference, Minsk, March 23–24, 2017]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 426–428 (in Russian).

Received: 14.10.2021

Accepted: 15.12.2021

Published online: 31.03.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-114-128>

УДК 697.9

Оценка эффективности энергосберегающей системы организованной приточно-вытяжной вентиляции для многоэтажных зданий с низким уровнем тепловой защиты

Магистры В. А. Зафатаев¹⁾, С. В. Ланкович¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты Т. И. Королёва¹⁾, А. М. Нияковский¹⁾

¹⁾Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. С использованием разработанного авторами метода технико-экономического расчета установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа исследованы режимы эксплуатации централизованной приточно-вытяжной системы организованной вентиляции, в которой подогрев приточного воздуха осуществляется за счет теплоты солнечного излучения и теплоты удаляемого из помещений воздуха. Представлены результаты оценки тепловой и экономической эффективности такой системы вентиляции для многоэтажных зданий. Выполнено сравнение расходов тепловой энергии на нужды отопления и вентиляции за счет применения предлагаемой системы вентиляции для двух вариантов зданий – с уровнем тепловой защиты ограждающих конструкций, отвечающим современным нормативным требованиям (здания с теплопотреблением до 130 кВт·ч/(м²·год)), и для аналогичного по планировочной структуре здания, но с ограждающими конструкциями, уровень утепления которых соответствует зданиям постройки до 1993 г. (здания с теплопотреблением до 260 кВт·ч/(м²·год)). Определены температурные условия, при которых возникает необходимость включения в работу устройств дополнительного (пикового) подогрева приточного воздуха, когда тепловой потенциал солнечного излучения и вторичных энергетических ресурсов недостаточен для обеспечения расчетной температуры приточного воздуха. Для рассматриваемой системы вентиляции установлено наличие влияния термических сопротивлений ограждающих конструкций здания на показатели термодинамической и экономической эффективности предлагаемого решения. Определены климатические условия, при которых утилизация теплоты удаляемого воздуха в системе вентиляции технически оправдана и экономически целесообразна. Результаты выполненных исследований могут быть использованы при определении путей тепловой модернизации зданий с традиционными системами отопления и вентиляции.

Ключевые слова: воздухоприемный щелевой канал, солнцеприемная панель, тепловой поток, излучение, конвекция, вентиляция, энергосбережение

Для цитирования: Оценка эффективности энергосберегающей системы организованной приточно-вытяжной вентиляции для многоэтажных зданий с низким уровнем тепловой защиты / В. А. Зафатаев [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 114–128. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-114-128>

Effectiveness Assessment of Energy-Saving System of Organized Supply and Exhaust Ventilation for Multi-Storey Buildings with Low Level Thermal Protection

V. A. Zafatayeu¹⁾, S. V. Lankovich¹⁾, T. I. Karalioua¹⁾, A. M. Niyakovskii¹⁾

¹⁾Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Abstract. By usage of the technical and economic calculation method developed by the authors for installations with recuperative-type heat exchangers, the operational modes of the centralized supply and exhaust system of organized ventilation,

Адрес для переписки

Нияковский Александр Мечиславович
Полоцкий государственный университет
ул. Блохина, 29,
211440, г. Новополоцк, Республика Беларусь
Тел.: +375 214 59-95-40
a.m.niyakovski@pdu.by

Address for correspondence

Niyakovskii Aleksandr M.
Polotsk State University
29, Blokhin str.,
211440, Novopolotsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 214 59-95-40
a.m.niyakovski@pdu.by

in which the supplying air is heated by the solar radiation heat and the heat of the air removed from the premises, have been investigated in the paper. The paper presents results of the thermal and economic efficiency assessment of such ventilation system for multi-storey buildings. A comparison of the thermal energy consumption for the needs of heating and ventilation through the use of the proposed ventilation system has been made for two variants of buildings – with the thermal protection level of enclosing structures that meets modern regulatory requirements (buildings with heat consumption up to 130 kW·h/(m²·year)), and for a building similar in terms of planning structure, but with enclosing structures, the insulation level of which corresponds to buildings built before 1993 (buildings with heat consumption up to 260 kW·h/(m²·year)). The temperature conditions have been determined under which it becomes necessary to turn on the operation of devices for additional (peak) heating of the supply air, when the thermal potential of solar radiation and secondary energy resources is insufficient to provide the calculated temperature of the supply air. For the ventilation system under consideration, it has been established that the thermal resistance of the building envelope influences the indicators of the thermodynamic and economic efficiency of the proposed solution. The climatic conditions under which the utilization of the exhaust air heat in the proposed ventilation system is technically justified and economically expedient have been determined. The results of the research performed can be used for determination of the thermal modernization ways of buildings with traditional heating and ventilation systems.

Keywords: air-intake slot-hole channel, solar panel, heat flow, radiation, convection, ventilation, energy saving

For citation: Zafatayeu V. A., Lankovich S. V., Karaliova T. I., Niyakovskii A. M. (2022) Effectiveness Assessment of Energy-Saving System of Organized Supply and Exhaust Ventilation for Multi-Storey Buildings with Low Level Thermal Protection. *Science and Technique*. 21 (2), 114–128. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-114-128> (in Russian)

Введение

Повышение эффективности использования первичных энергетических ресурсов – важная задача для мировой экономики, которая также актуальна для Республики Беларусь. Согласно статистическим данным [1], наиболее энергоемким в нашей стране является жилищный сектор, а доминирующим видом топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в конечном потреблении, как следует из рис. 1, 2, служит тепло-

вая энергия. На ее долю в жилищном секторе приходится около 38 % конечного потребления ТЭР [1].

Жилищный фонд Беларуси – это 98 % от всех типов зданий в стране [2]. К 2000 г. в республике потребление энергии на отопление и вентиляцию жилых помещений составляло 120–260 кВт·ч/(м²·год) отапливаемой площади за отопительный период в зависимости от архитектурно-планировочного решения здания (рис. 3).



Рис. 1. Конечное потребление топливно-энергетических ресурсов по секторам национальной экономики

Fig. 1. Final consumption of fuel and energy resources by the national economy sectors

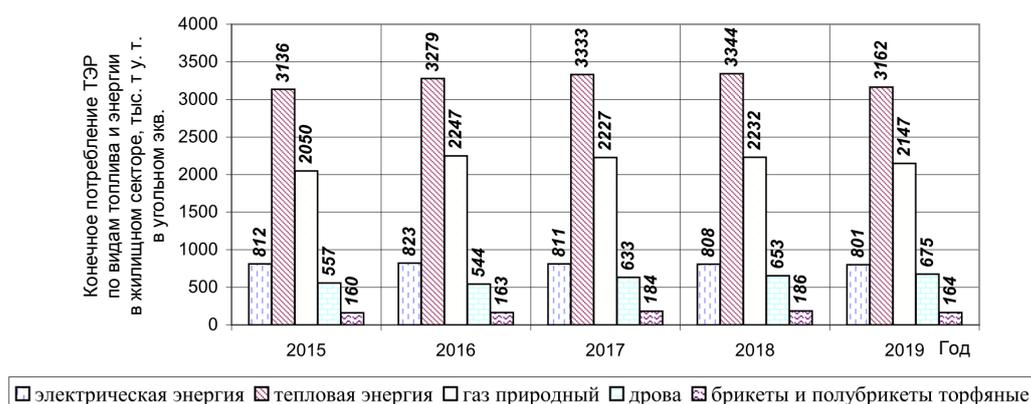


Рис. 2. Конечное потребление топливно-энергетических ресурсов по видам топлива и энергии в жилищном секторе

Fig. 2. Final consumption of fuel and energy resources by types of fuel and energy in the residential sector

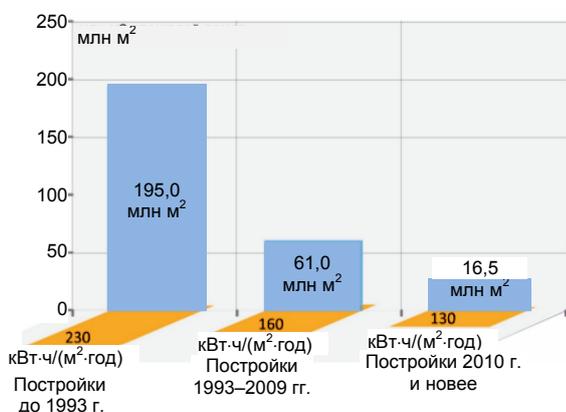


Рис. 3. Распределение площадей домов жилого фонда по удельному расходу тепловой энергии в Республике Беларусь [5]

Fig. 3. Distribution of areas of housing stock by specific consumption of thermal energy in the Republic of Belarus [5]

Для сравнения, в Швеции и Финляндии, в которых более суровый климат, этот показатель 140 кВт·ч/(м²·год) [3], в Дании – 88 кВт·ч/(м²·год), в Германии – 85 кВт·ч/(м²·год) [4]. В настоящее время доля жилых зданий с недостаточным по современным нормам уровнем тепловой защиты ограждающих конструкций составляет 93 %.

Причина высокого уровня потребления тепловой энергии – не только низкое качество тепловой защиты ограждающих конструкций зданий, но и технологически устаревшее, часто физически изношенное оборудование, применяемое в традиционных системах отопления и вентиляции. Для повышения эффективности использования энергии в жилищном секторе требуются разработка и внедрение энергоэффективных мероприятий, технологий и процес-

сов, которые позволят задействовать потенциал вторичных и возобновляемых ТЭР для нужд теплообеспечения [6], например, с помощью устройств для утилизации теплоты воздуха, удаляемого системами вентиляции. Исследования эффективности подобных систем вентиляции и определение величины снижения затрат ТЭР на нужды отопления и вентиляции за счет их внедрения представлены в [7–10]. Однако результаты и выводы, содержащиеся в этих работах, ограничиваются особенностями и назначением объектов, на которых внедряются системы вентиляции, а также конструктивными особенностями схем предлагаемых систем. Кроме того, в упомянутых работах не в полной мере изучены аэродинамические и тепловлажностные процессы, имеющие место в потоках приточного и удаляемого воздуха, а приведенные в них расчеты сводятся к получению абсолютных величин затрат энергии по укрупненным и/или удельным показателям. Вместе с тем, согласно опыту проектирования систем вентиляции, обеспечивать воздухообмен в многоквартирных жилых домах предпочтительнее за счет централизованных вентиляционных систем, а в малоэтажных и частных – за счет индивидуальных приточно-вытяжных вентиляционных установок [11].

Для решения этих проблем предлагается система централизованной организованной приточно-вытяжной вентиляции [12, 13], в которой подогрев приточного воздуха осуществляется в щелевом канале остекленного фасада под действием солнечного излучения (рис. 4).

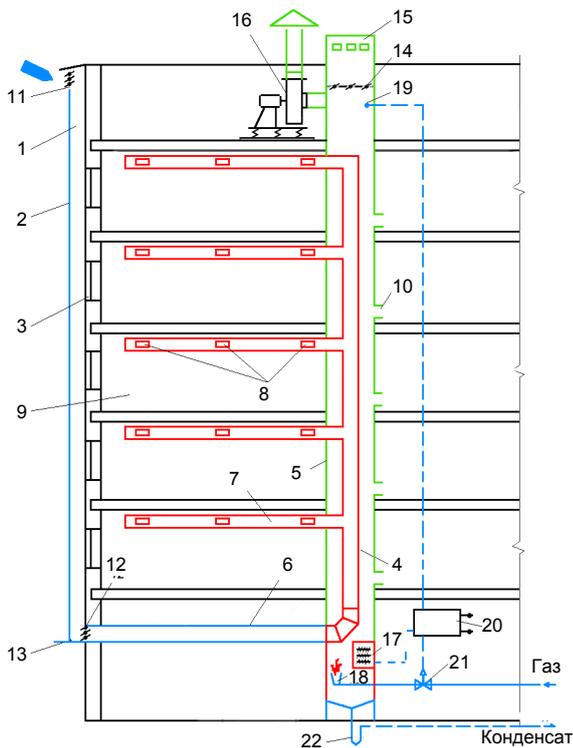


Рис. 4. Схема приточно-вытяжной системы вентиляции многоэтажного здания: 1 – щелевой канал; 2 – навесной светопрозрачный вентилируемый фасад; 3 – наружное вертикальное стеновое ограждение с окнами; 4, 6 – вертикальный и горизонтальный приточные воздуховоды; 5 – теплообменная камера вытяжной шахты; 7 – приточные горизонтальные распределительные воздуховоды; 8 – регулируемые приточные решетки; 9 – вентилируемые помещения; 10 – поквартирные вытяжные патрубки; 11 – регулируемая воздухозаборная решетка; 12 – утепленный клапан; 13 – воздушный клапан навесного фасада; 14 – воздушный клапан на вытяжной шахте; 15 – вытяжная шахта; 16 – вытяжной вентилятор; 17 – электронагреватель; 18 – газовая горелка; 19 – датчик температуры; 20 – электронный блок устройства подогрева; 21 – электромагнитный клапан подачи газа; 22 – поддон для сбора конденсата с конденсатоотводом через гидрозатвор

Fig. 4. Scheme of supply and exhaust ventilation system of multi-storey building: 1 – slotted channel; 2 – hinged translucent ventilated facade; 3 – external vertical wall enclosure with windows; 4, 6 – vertical and horizontal supply air ducts; 5 – heat exchange chamber of exhaust shaft; 7 – supply horizontal distribution ducts; 8 – adjustable supply grilles; 9 – ventilated apartments; 10 – apartment exhaust pipes; 11 – adjustable air intake grille; 12 – insulated valve; 13 – air valve of hinged facade; 14 – air valve on the exhaust air shaft; 15 – exhaust air shaft; 16 – exhaust air fan; 17 – electric heater; 18 – gas burner; 19 – temperature sensor; 20 – electronic unit of heating device; 21 – solenoid valve for gas supply; 22 – pan for collecting condensate with a condensate drain through a water seal

При движении по щелевому каналу воздух получает теплоту солнечного излучения, в том числе теплоту эффективного излучения наружной поверхности стены. Также в системе осуществляется передача теплоты от удаляемого из помещений воздуха к приточному воздуху в теплообменнике типа «труба в трубе». В случае отсутствия солнечного излучения либо его недостаточной интенсивности и соответствующей нехватки теплового потенциала удаляемого воздуха для догрева приточного воздуха до требуемой температуры в нижней части теплообменника оборудовано устройство подогрева, включающее электронагреватель и газовую горелку. В статье приведены исследования режимов работы данного технического решения.

Постановка задачи и описание методики исследования

Основной задачей исследования являлась разработка научно обоснованных рекомендаций для технико-экономического расчета и последующей эффективной эксплуатации предлагаемой системы вентиляции в климатических условиях Республики Беларусь. Для идентификации предметной области научного исследования рассматриваемую систему вентиляции целесообразно разделить на два основных последовательно соединенных блока согласно особенностям физических процессов, протекающих в системе. Первый блок – щелевой канал навесного вентилируемого фасада, второй – воздухо-воздушный теплообменник типа «труба в трубе».

Процессы тепло- и влагообмена, аэродинамики воздушных масс, происходящие в воздушных прослойках и вентилируемых фасадах, изучались рядом отечественных и зарубежных авторов [14–24]. Результаты и выводы этих работ ограничиваются областью типового применения вентилируемых фасадов со свободно-конвективными потоками воздуха, тогда как авторы данной статьи предлагают использовать воздушный щелевой канал, образованный навесной остекленной панелью фасада и наружной стеной здания, как обогреваемый за счет солнечного облучения участок с вынужденным движением в нем потока воздуха под действием поверхностных сил, создаваемых вентилятором.

Тепло- и влагообмен в воздухо-воздушных теплообменниках рекуперативного типа, применяемых в системах вентиляции зданий, исследован в [8, 25–28]. Результаты и выводы в этих работах распространяются на типовые конструкции теплообменников рекуперативного типа, в основном пластинчатые, с перекрестноточной схемой распределения теплоносителей. В предлагаемой же системе вентиляции конструкция теплообменника приточно-вытяжной шахты иная – это прямоточный теплообменник рекуперативного типа «труба в трубе». Процессы теплообмена в нем исследовали с применением разработанного авторами статьи численного метода технико-экономического расчета установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа, который позволяет анализировать параметры режимов эксплуатации, определять обобщенные и локальные показатели термодинамической и экономической эффективности, влияние конструктивных характеристик поверхности теплообмена на эти показатели.

В статье представлены результаты сравнения расходов тепловой энергии на нужды отопления и вентиляции за счет применения предлагаемой системы вентиляции для двух вариантов зданий – с уровнем тепловой защиты ограждающих конструкций, отвечающим современным нормативным требованиям (здания с теплопотреблением до 130 кВт·ч/(м²·год)), и для аналогичного по планировочной структуре здания, но с ограждающими конструкциями, уровень утепления которых соответствует домам постройки до 1993 г. (с теплопотреблением до 260 кВт·ч/(м²·год)). Как было отмечено выше, зданий с таким недостаточным уровнем утепления в Беларуси подавляющее большинство (около 195 млн м²). Кроме того, в статье приведены значения требуемых расходов энергии в устройстве дополнительного (пикового) подогрева приточного воздуха по обоим вариантам зданий при различных температурах наружного воздуха в отопительный период, произведено сравнение величин затрат на нужды отопления и вентиляции при работе предлагаемой системы вентиляции и традиционных систем отопления и вентиляции, в которых отсутствует возможность использования энергии возобновляемых источников и вторичных ресурсов.

Необходимость подобного сравнения продиктована в первую очередь длительными сроками окупаемости работ по тепловой реновации зданий, построенных в советский период, и в целом, как показывает практика, экономической нерациональностью этих мероприятий в условиях, характерных для Беларуси. В мировой практике принято считать целесообразным повышение уровня тепловой защиты оболочки зданий, если рентабельность капиталовложений в тепловую изоляцию будет не менее 10 % за счет прибыли от сбережения тепловой энергии, т. е. при сроке окупаемости термореновации не более 10 лет [29]. В республике с установленными для жилищного сектора субсидируемыми тарифами на тепловую энергию, полученную от централизованных источников, покрываемыми не более 30 % экономически обоснованных затрат на ее выработку [30], сроки окупаемости термореновации увеличиваются в 3–4 раза. С одной стороны [31], повышение уровня тепловой защиты зданий дает эффект только при одновременном снижении потерь теплоты в системах вентиляции зданий, доля которых среди других теплопотерь растет вместе с увеличением термического сопротивления ограждающих конструкций и в зданиях с современным уровнем тепловой защиты доходит до 53 % [32]. С другой стороны, экономия энергии на нужды отопления и вентиляции за счет ужесточения норм и правил строительной теплотехники для вновь строящихся зданий не составит и 5 % в ближайшие 10 лет (при ежегодном приросте новых жилых площадей примерно на 1,5 % от существующих площадей) [3]. Таким образом, здания стареют быстрее, чем идет строительство новых и проводятся капитальный ремонт, модернизация или реконструкция ветхого и аварийного жилищного фонда.

Результаты расчетов эффективности рассматриваемой системы вентиляции для различных условий ее работы представлены в [12, 33]. Приведем описание основных принципов расчета, отражающих способ получения оценки тепловой и экономической эффективности системы вентиляции в двух случаях. Поступление теплоты от солнечной радиации не поддается упорядочиванию по часам суток и не зависит от температуры наружного воздуха (рис. 5) [12].

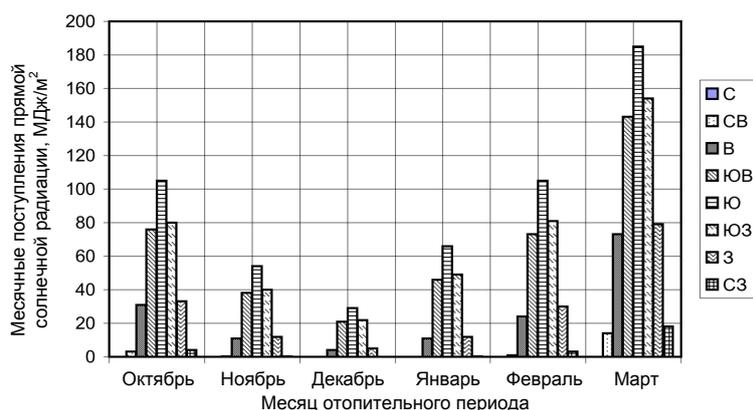


Рис. 5. Месячные поступления прямой солнечной радиации на вертикальную поверхность различной ориентации при средних условиях облачности в отопительный период (метеорологическая станция «Полоцк», по данным СНБ 2.04.02–2000)

Fig. 5. Monthly receipts of direct solar radiation on a vertical surface of various orientations under average cloudiness conditions during the heating season (by meteorological station “Polotsk”, according to BSB [Construction Standards of the Republic of Belarus] 2.04.02–2000)

Силикатное стекло, используемое в свето-прозрачных ограждающих конструкциях зданий, способно пропускать тепловую энергию от прямой и рассеянной солнечной радиации в зоне спектра видимых лучей и в ближнем инфракрасном диапазоне. Этот тепловой поток, проходя через стекло, поглощается различными поверхностями, которые в итоге становятся источниками инфракрасного излучения дальнего диапазона. Обычное стекло является экраном для излучения дальнего диапазона [12]. Таким образом, изменение температуры воздуха по высоте воздухоприемного щелевого канала определено на примере математической модели теплообмена в обогреваемой щели, образованной поверхностями с различными температурами (облучаемые солнцем стеклянный фасад и наружная поверхность стены здания) [34, 35].

Ширина и высота стекла навесного фасада приняты кратными ширине и высоте стеновой

панели одной жилой комнаты, а расчетный размер щели воздухоприемного канала – 5 см (входит в диапазон рекомендуемых для типовых воздушных прослоек [36]). Среднее по румбам значение суммарной солнечной радиации при средней облачности в отопительный период с октября по март включительно по данным табл. 3.15 СНБ 2.04.02–2000 для вертикальных поверхностей ограждений, ориентированных на В, ЮВ, Ю, ЮЗ и З, составляет для г. Полоцка $I_{\text{ср}} = 223 \text{ Вт/м}^2$ [12]. Эта величина интенсивности принята в качестве расчетной и предельной для всего отопительного периода. Как было отмечено ранее [12, 33], определить эффективность использования энергии на нужды отопления и вентиляции для каждого месяца отопительного периода невозможно по причине отсутствия зависимости между помесечной продолжительностью солнечного сияния и временем стояния температуры наружного воздуха (рис. 6, 7).

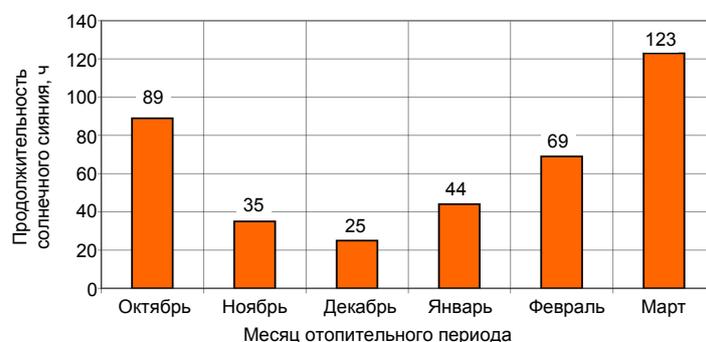


Рис. 6. Продолжительность солнечного сияния по г. Полоцку по месяцам отопительного периода (по данным СНБ 2.04.02–2000)

Fig. 6. Duration of sunshine, hours, in Polotsk town by months of the heating season (according to BSB 2.04.02–2000)

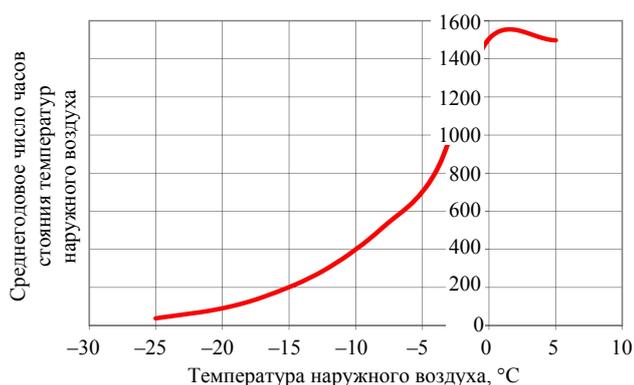


Рис. 7. Среднегодовое число часов стояния температур наружного воздуха по г. Полоцку (по данным СНБ 2.04.02–2000)

Fig. 7. Average annual number of hours of outside air temperatures standings in Polotsk town (according to BSB 2.04.02–2000)

Для решения указанной проблемы разработан следующий подход [12]: величину экономии энергии на нужды отопления и вентиляции здания по каждому месяцу определяли как долю максимально возможной экономии энергии на нужды отопления и вентиляции в отопительный период за счет работы предлагаемой системы вентиляции в зависимости от температуры наружного воздуха, где в качестве коэффициента пропорциональности использовали отношение продолжительности солнечного сияния в часах по каждому месяцу отопительного периода к количеству часов в соответствующем месяце отопительного периода. Таким образом, для Полоцка длительность солнечного сияния в октябре составила 10,7 % от времени работы системы вентиляции за этот месяц, в ноябре – 4,2, в декабре – 3,0, в январе – 5,3, в феврале – 8,3, в марте – 14,9 %.

Сопротивления теплопередаче принимали равными нормативным согласно СН 2.04.02–2020: для наружных стен современного здания с теплопотреблением до 130 кВт·ч/(м²·год) – 3,2 м²·°C/Вт, для заполнения оконных проемов – 1,0 м²·°C/Вт. Для здания с уровнем утепления, не отвечающим современным требованиям (с теплопотреблением до 260 кВт·ч/(м²·год)), принято сопротивление теплопередаче наружных стен 1,0 м²·°C/Вт, что типично, например, для стен из кирпича толщиной до 400 мм без слоя утеплителя; для заполнения оконных проемов принято сопротивление теплопереда-

че 0,42 м²·°C/Вт (двойное остекление в раздельных деревянных переплетах).

Расчетная температура приточного воздуха, подаваемого в помещения, принята во всех случаях одинаковой и равной 22 °C (верхний предел диапазона оптимальных значений для жилых помещений согласно ГОСТ 30494–2011). На самом деле, величина этой температуры должна быть переменной (определяемой по расчету) в зависимости от изменения температуры наружного воздуха, а мощность устройства дополнительного (пикового) подогрева, а также его включение и выключение в предлагаемой системе вентиляции должны управляться автоматически по сигналам датчика температуры, установленного в контрольном помещении. Очевидно, что при низких температурах наружного воздуха теплового потенциала воздуха в приточной струе с температурой 22 °C может попросту не хватить для обеспечения нужд отопления и вентиляции и поддержания нормируемого уровня температуры в помещениях только лишь за счет работы предлагаемой системы вентиляции. Поэтому в данном случае следует говорить о том, что в период экстремально низких температур наружного воздуха пиковый догрев воздуха в помещениях, в первую очередь с точки зрения санитарных требований, было бы более целесообразно осуществить за счет традиционной водяной системы отопления с отопительными приборами. Тем не менее это не означает, что предлагаемая система вентиляции не может справиться с обеспечением и поддержанием в помещениях нормируемой температуры воздуха в периоды экстремально низких температур.

Производительность предлагаемой системы вентиляции принята исходя из нормируемого количества приточного воздуха на 1 м² жилой площади, равного 3 м³/(ч·м²) согласно требованиям СН 3.02.01–2019 «Жилые здания». Для многоквартирных жилых домов типовых серий, применяемых в Республике Беларусь [37], воздухообмен одной жилой комнаты площадью пола 4 · 5 = 20 м² авторами статьи оценен как 3 · 20 = 60 м³/ч. Соответственно в девятиэтажном жилом здании система вентиляции должна обеспечивать воздухообмен девяти таких комнат: 9 · 60 = 540 м³/ч.

В проводимом исследовании исключены из рассмотрения воздухо- и паропроницаемость ограждающей конструкции, закрытой навесным остекленным фасадом, а также конвективный перенос водяных паров в щелевом канале в связи с пренебрежимо малым влиянием на теплообмен [38]. Влияние на тепловую неоднородность ограждающей конструкции стены опорных элементов навесного фасада не учитывали, поскольку натурными тепловизионными исследованиями [16] на стене не было выявлено регулярно повторяющихся температурных неоднородностей, связанных с опорными элементами вентилируемого фасада.

При наличии солнечного излучения интенсивностью $I_{\text{ср}}$ количество воспринимаемой приточным воздухом лучистой теплоты определено исходя из значения тепловой эффективности существующих солнечных панелей, которая в настоящее время не превышает $E = 0,14-0,17$ [36]. Коэффициент теплопропускания солнечного излучения стеклом навесной панели принят $C_{\text{ст}} = 0,6$ [39]. Учтено загрязнение атмосферного воздуха, характерное для крупных городов, из-за чего воздушная среда имеет более высокую оптическую плотность, что является причиной ухудшения условий инсоляции. Кроме того, пылевые и сажевые микрочастицы, витающие в воздухе, способны оседать на поверхности светопрозрачных элементов зданий, снижая степень их свето- и теплопропускания. Солнечное излучение, частично пропущенное стеклом навесной панели, частично воспринятое потоком приточного воздуха, поглощается наружной стеной с коэффициентом поглощения $A = 0,6$ [40]. Таким образом, количество отраженной от стены в поток воздуха вторичной радиационной теплоты составляет $0,6 \cdot (1 - A) \cdot (1 - E)I_{\text{ср}}$.

Плотность результирующего теплового потока при теплообмене излучением между стенкой и воздухом, $\text{Вт}/\text{м}^2$ [41]:

$$q_{\text{изл.рез}} = \varepsilon'_{\text{ст}} (E_{\text{ст}} - E_{\text{г}}), \quad (1)$$

где $\varepsilon'_{\text{ст}}$ – эффективная степень черноты поверхностей канала, $\varepsilon'_{\text{ст}} = \frac{\varepsilon_{\text{ст}} + 1}{2}$; $\varepsilon_{\text{ст}}$ – степень черноты стенок канала, принята 0,93 [12]; $E_{\text{ст}}$ – плотность потока излучения, поглощенного возду-

хом от стенок канала (складывается из части излучения, падающего на стеклянную панель навесного фасада, и излучения, отраженного от поверхности стены), $\text{Вт}/\text{м}^2$; $E_{\text{г}}$ – плотность потока собственного излучения воздуха при его температуре в воздухоприемном канале, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Лучистая теплота солнечного излучения проходит через светопрозрачные оконные конструкции и нагревает внутренние поверхности помещений, что учитывается дополнительно при расчете бытовых теплопоступлений, Вт [12]:

$$Q_{\text{быт.доп}} = 9 \cdot (1 - \eta) F_{\text{пом}} + C_{\text{стп}} C_{\text{ст}} (1 - E) F_{\text{ост}}, \quad (2)$$

где η – коэффициент, учитывающий способ регулирования тепловой нагрузки системы отопления здания (СН 4.02.03–2019, Приложение К), используется в расчете для здания с традиционными системами отопления и вентиляции, без автоматического регулирования; $C_{\text{стп}}$ – то же теплопропускания стеклопакета, колеблется в пределах 0,30–0,75 [42], принят равным 0,60; $F_{\text{пом}} = 4 \cdot 5 = 20 \text{ м}^2$, $F_{\text{ост}} = 1,5 \cdot 2 = 3 \text{ м}^2$ – площадь пола помещения и остекления соответственно.

Количество теплоты, требуемой для нагрева инфильтрующегося воздуха, рассчитывается согласно методике СН 4.02.03–2019 (Приложение Е) и учитывается в тепловом балансе только для периода отсутствия солнечного излучения. При наличии солнечного излучения инфильтрующийся воздух подогревается за счет теплоты солнечной радиации и входит в тепловой баланс как теплопоступления [2]. При отсутствии навесного фасада расход теплоты на нагрев наружного воздуха при инфильтрации составляет по расчету $Q_{\text{инф}} = 9151 \text{ Вт}$ [12].

В связи с вышеизложенным теплообмен в дневное время суток значительно отличается от теплообмена в ночное время суток, и уравнение теплового баланса принимает вид [12]:

– для периода без солнечного излучения, Вт :

$$\pm \Delta Q = Q_{\text{тр}}^{\text{ст}} + Q_{\text{тр}}^{\text{ок}} + Q_{\text{тр}}^{\text{пл}} + Q_{\text{тр}}^{\text{пт}} + Q_{\text{инф}} - Q_{\text{быт}}; \quad (3)$$

– для периода с наличием солнечного излучения, Вт

$$\pm \Delta Q = Q_{\text{тр}}^{\text{ст}} + Q_{\text{тр}}^{\text{ок}} + Q_{\text{тр}}^{\text{пл}} + Q_{\text{тр}}^{\text{пт}} - Q_{\text{быт.доп}} - Q_{\text{конв}}; \quad (4)$$

где $Q_{\text{тр}}^{\text{ст}}$, $Q_{\text{тр}}^{\text{ок}}$, $Q_{\text{тр}}^{\text{пл}}$, $Q_{\text{тр}}^{\text{пт}}$ – трансмиссионные потери теплоты через стены, окна, перекрытие

подвала и покрытие (чердачное перекрытие), Вт; $Q_{инф}$ – потери теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха, Вт; $Q_{быт}$, $Q_{быт.доп}$ – бытовые тепловыделения и тепловыделения в помещениях с учетом аккумулированной теплоты внутренними поверхностям, Вт; $Q_{конв}$ – конвективный тепловой поток от воздуха к стене в воздухоприемном канале, Вт; $\pm \Delta Q$ – избытки («+») или недостатки («-») теплоты.

Экономия теплоты, Гкал, в случае наличия устойчивого солнечного излучения

$$\begin{aligned} \Delta Q = 8,6 \cdot 10^{-4} \cdot \left(Q_{тр}^{ст} + Q_{тр}^{ок} + Q_{тр}^{пл} + \right. \\ \left. + Q_{тр}^{пт} - Q_{быт.доп} - Q_{конв} \pm Q_{ТВТ} \right) z_{ч}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $Q_{ТВТ}$ – подогрев приточного воздуха в теплообменнике-утилизаторе типа «труба в трубе», кВт (знак «-» подставляется в случае необходимости включения устройства пикового подогрева приточного воздуха, «+» – наоборот); $z_{ч}$ – время стояния температур наружного воздуха, ч.

Затраты теплоты, Гкал, в случае отсутствия солнечного излучения

$$\begin{aligned} Z_Q = 8,6 \cdot 10^{-4} \cdot \left(Q_{тр}^{ст} + Q_{тр}^{ок} + Q_{тр}^{пл} + Q_{тр}^{пт} + \right. \\ \left. + Q_{инф} - Q_{быт} \pm Q_{ТВТ} \right) z_{ч}. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты исследования

В диапазоне температур наружного воздуха (-26)–(+8) °С в отопительный период при устойчивом солнечном облучении на выходе из воздухоприемного канала воздух имеет на 0,9–3,0 °С более высокую температуру в здании с уровнем утепления, не отвечающим современным требованиям (далее – здание без термореновации), чем в современном здании (далее – здание с термореновацией) (рис. 8). Зависимость температуры воздуха на выходе из воздухоприемного канала от температуры наружного воздуха практически линейная. Причем, чем выше температура наружного воздуха, тем менее интенсивно подогревается воздух в воздухоприемном канале здания без термореновации. Интенсивность теплообмена по высоте щелевого канала снижается, в том числе вследствие уменьшения температурного напора между подогреваемым воздухом и температурой поверхности стены.

Требуемая величина догрева приточного воздуха после щелевого канала снижается при повышении температуры наружного воздуха, и при температурах наружного воздуха от (-5,9) °С и выше включение устройства дополнительного подогрева воздуха не требуется для обоих сравниваемых зданий.

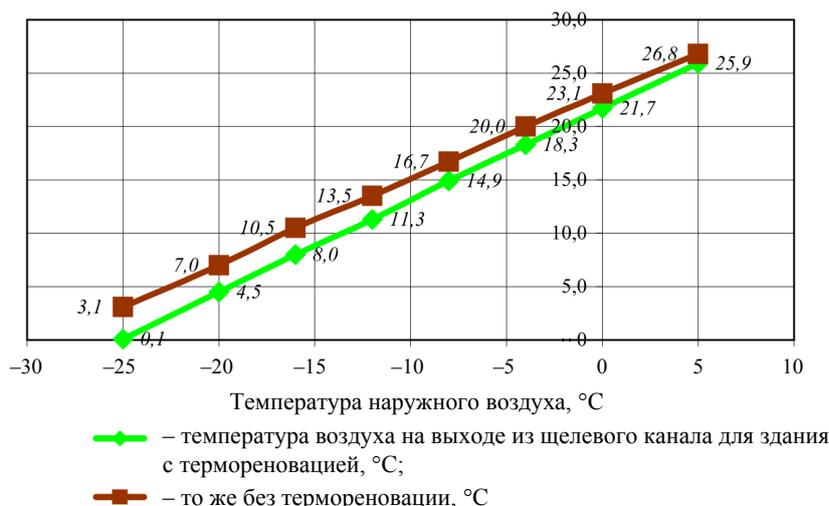


Рис. 8. Зависимость температуры воздуха на выходе из воздухоприемного канала от температуры наружного воздуха при разном уровне утепления здания

Fig. 8. Dependence of air temperature at the outlet of air intake duct on the outside air temperature at different levels of building insulation

При температурах наружного воздуха от $(-1,9)^\circ\text{C}$ и выше для обоих зданий догрев воздуха после щелевого канала вовсе не требуется. Как было отмечено в [12], для недопущения перегрева помещений в периоды, когда не требуется догрев воздуха после щелевого канала, удаление загрязненного воздуха из помещений следует производить по резервированным вентиляционным шахтам без утилизации теплоты удаляемого воздуха в теплообменнике «труба в трубе» приточно-вытяжной шахты. В том случае, если устройство дополнительного подогрева воздуха задействовано не будет, верхним температурным пределом для нагрева приточного воздуха в теплообменнике, расположенном в приточно-вытяжной шахте, будет температура вытяжного воздуха, удаляемого из помещений.

При движении по воздухоприемному каналу температура воздуха повышается и в какой-то момент становится выше, чем температура поверхности стены здания [12] (для рассматриваемого девятиэтажного здания это происходит на уровне 3–5 этажей). При этом направление конвективного теплового потока меняется на противоположное, в результате чего воздух при движении вниз начинает охлаждаться, отдавая стене теплоту в ходе конвективного теплообмена. Величина результирующего потока тепловой энергии, переносимой излучением, уменьшается медленнее, чем величина теплового потока, обусловленного конвективным теплообменом, и для здания без термореновации оказывается на 0,5–1,3 % меньше, чем для здания с термореновацией (меньшие значения соответствуют более высоким температурам наружного и подогреваемого в щелевом канале воздуха, и наоборот).

Во всем диапазоне температур наружного воздуха в отопительный период при устойчивом солнечном облучении величина конвективного потока от воздуха в щелевом канале к поверхности стены здания в 1,07–1,34 раза больше для здания с термореновацией, чем для здания без нее (рис. 9, 10), поскольку встречный тепловой поток от стены здания без термореновации частично снижает интенсивность охлаждения воздуха у поверхности этой стены (меньшие значения соответствуют более высо-

ким температурам наружного и подогреваемого в щелевом канале воздуха, и наоборот).

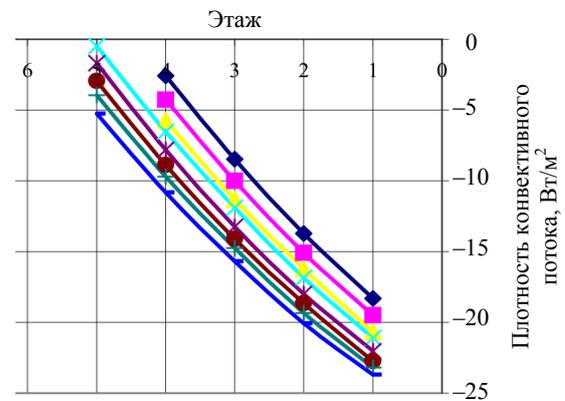


Рис. 9. Изменение плотности конвективного потока в воздухоприемном канале от воздуха к стене по этажам при наличии солнечного облучения для здания с термореновацией: —♦— при температурах минус 26–22 °С; —▲— минус 17,9–14,0 °С; —*— минус 9,9–6,0 °С; —+— от минус 1,9 до плюс 2,0 °С; —■— минус 21,9–18,0 °С; —x— минус 13,9–10,0 °С; —●— минус 5,9–2,0 °С; —■— от плюс 2,1 до плюс 8,0 °С

Fig. 9. Changes in density of convective flow in air intake duct from air to wall along the floors of the building in the presence of solar irradiation for a building with thermal renovation: —♦— at temperatures of minus 26–22 °С; —▲— minus 17.9–14.0 °С; —*— minus 9.9–6.0 °С; —+— from minus 1.9 to plus 2.0 °С; —■— minus 21.9–18.0 °С; —x— minus 13.9–10.0 °С; —●— minus 5.9–2.0 °С; —■— from plus 2.1 to plus 8.0 °С

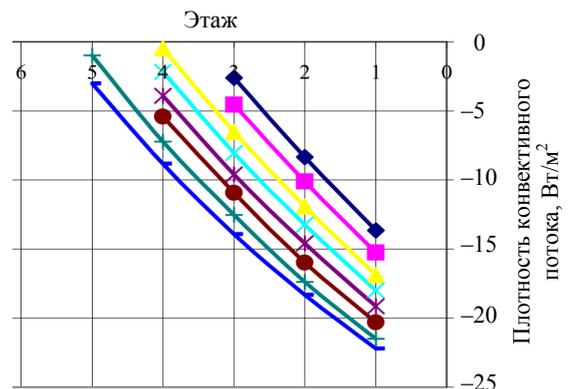


Рис. 10. Изменение плотности конвективного потока в воздухоприемном канале от воздуха к стене по этажам при наличии солнечного облучения для здания без термореновации (обозначения те же, что на рис. 9)

Fig. 10. Change in density of convective flow in air intake duct from air to wall along the floors of the building in the presence of solar irradiation for a building without thermal renovation (the designations are the same as in Fig. 9)

На рис. 11 показано изменение величин возможной экономии энергии на нужды отопления и вентиляции здания за счет работы предлагаемой системы вентиляции (при наличии устойчивого солнечного облучения) и затрат энергии на нужды отопления и вентиляции (в случае отсутствия или невозможности использования вторичных и возобновляемых источников энергии для нужд отопления и вентиляции) в зависимости от температуры наружного воздуха для здания без термореновации ограждающих конструкций и современного здания (с термореновацией).

При устойчивом солнечном облучении здания предлагаемая система вентиляции будет обеспечивать расчетную температуру приточного воздуха без необходимости использования дополнительных (пиковых) устройств подогрева при температурах наружного воздуха от $(-1,9)^\circ\text{C}$ и выше в здании с термореновацией и от $(+2,1)^\circ\text{C}$ и выше в здании без нее. Этому обстоятельству соответствует величина максимальной теоретической экономии энергии на нужды отопления и вентиляции при работе предлагаемой системы вентиляции – большей, чем затраты на те же нужды в традиционных системах отопления и вентиляции при температурах наружного воздуха от $(-1,9)^\circ\text{C}$ и выше для здания с термореновацией и от $(+2,1)^\circ\text{C}$ и выше для здания без нее.

При температурах наружного воздуха от $(-14)^\circ\text{C}$ и ниже для здания с термореновацией и от $(-10)^\circ\text{C}$ и ниже для здания без нее отсутствует экономический эффект за счет использо-

вания тепловой энергии возобновляемых и вторичных источников (солнечное излучение, теплота удаляемого воздуха) в предлагаемой системе вентиляции. В эти периоды нормируемые условия микроклимата должны обеспечиваться за счет включения устройств дополнительного подогрева воздуха в рассматриваемой системе вентиляции, либо за счет включения в работу традиционной системы водяного отопления.

Максимальные затраты энергии на нужды отопления и вентиляции в отопительный период в домах с традиционными источниками энергии или в случае полного отсутствия солнечного облучения в зданиях с предлагаемой системой вентиляции составляют 14,71 Гкал (1165,00 бел. руб.) при нормируемом уровне утепления и 20,21 Гкал (1599,30 бел. руб.) в зданиях без термореновации (т. е. для домов с недостаточным уровнем тепловой защиты затраты энергии на нужды отопления и вентиляции получились в 1,37 раза больше, чем с нормативным уровнем утепления).

В зданиях же с предлагаемой системой вентиляции в случае наличия устойчивого солнечного облучения максимальная экономия энергии на нужды отопления и вентиляции в отопительный период составила 12,40 Гкал (981,60 бел. руб.) при нормируемом уровне утепления и 6,30 Гкал (499,16 бел. руб.) в зданиях без термореновации (т. е. для домов с недостаточным уровнем тепловой защиты экономия энергии на нужды отопления и вентиляции в отопительный период получилась в 1,97 раза меньше, чем в домах с нормативным уровнем утепления).

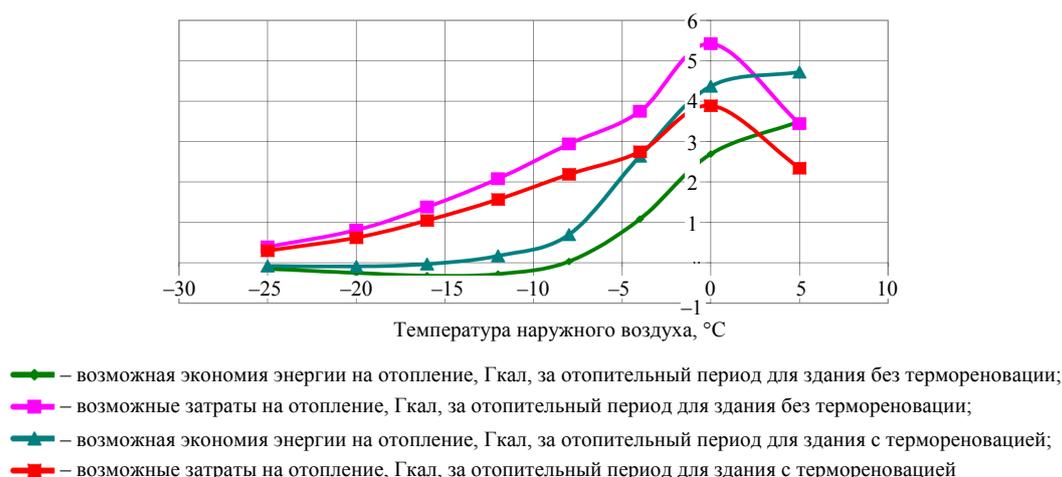


Рис. 11. Возможные экономия и затраты энергии на нужды отопления и вентиляции за отопительный период в расчете на одну солнцеприемную панель девяти типовых жилых комнат при разных уровнях утепления здания

Fig. 11. Possible savings and energy costs for heating and ventilation during the heating period per one solar panel of nine typical living rooms at different levels of building insulation

Максимальная теоретическая величина экономии тепловой энергии на нужды отопления и вентиляции за счет работы предлагаемой системы вентиляции при наличии устойчивого солнечного облучения в течение отопительного периода составила 84,3 % от затрат тепловой энергии в традиционных системах отопления и вентиляции аналогичного здания (с термореновацией) и 31,2 % по зданию без термореновации. Реальная же экономия в расчете на одну солнцеприемную панель девяти типовых жилых комнат за 385 ч солнечного сияния (по Полоцку) в течение отопительного периода оказалась 0,97 Гкал (76,72 бел. руб.) для здания с нормируемым и 0,49 Гкал (39,01 бел. руб.) с недостаточным уровнем утепления. Таким образом, чем выше уровень тепловой защиты наружных ограждающих конструкций здания, тем больше величина экономии энергии на нужды отопления и вентиляции за счет работы предлагаемой системы вентиляции и соответственно выше экономическая целесообразность ее внедрения. В случае применения предлагаемой системы вентиляции она будет работать экономичнее в два раза для здания с нормируемым уровнем тепловой защиты, чем для аналогичного по планировочной структуре здания постройки до 1993 г. То есть рациональным и экономически целесообразным способом повышения энергоэффективности является только сочетание различных конструктивных, инженерных и архитектурно-планировочных мероприятий [43]. Например, увеличение теплозащитных свойств ограждающих конструкций при одновременном использовании современных инженерных энергосберегающих методов и технологий в сочетании с компактной формой и планировкой здания.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований установлено, что сокращение потребления тепловой энергии на нужды отопления и вентиляции зданий жилого фонда Республики Беларусь за счет тепловой реабилитации их ограждающих конструкций до уровня, соответствующего действующим нормам тепловой устойчивости, не является экономически эффективным по причине длительности сроков окупаемости затрат на тепловую реабилитацию, поскольку действующие для населения тарифы на тепловую энергию, получаемую от централизованных источников, все еще не покрывают эконо-

мически обоснованных затрат на ее генерацию и транспортировку.

2. С использованием разработанного авторами метода технико-экономического расчета установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа исследованы режимы эксплуатации предложенной централизованной приточно-вытяжной системы организованной вентиляции, в которой подогрев приточного воздуха осуществляется за счет теплоты солнечного излучения и теплоты удаляемого из помещений воздуха.

3. Установлено влияние термических сопротивлений ограждающих конструкций здания на показатели термодинамической и экономической эффективности рассмотренной системы вентиляции.

4. Определены климатические условия, при которых утилизация теплоты удаляемого воздуха в предлагаемой системе вентиляции технически оправдана и экономически целесообразна.

5. Результаты выполненных исследований могут быть использованы при определении путей тепловой модернизации зданий с традиционными системами отопления и вентиляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетический баланс Республики Беларусь: статистический сборник / редкол.: И. В. Медведова (отв. ред.) [и др.]. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2020. 152 с.
2. Программа развития Организации Объединенных Наций. Итоговая оценка проекта ПРООН/ГЭФ: Беларусь: «Повышение энергетической эффективности жилых зданий»: отчет о проведении итоговой оценки [Электронный ресурс]: Ид. номер проекта ГЭФ: 4228; Ид. номер проекта PIMS ПРООН: 4290 / международный консультант Роланд Вон; национальный консультант Виктория Калоша. Минск, 2018. Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by/effbuild/download/33.pdf>. Дата доступа: 27.08.2021.
3. Кузнецов, Ю. В. Энергосберегающие технологии и мероприятия в системах энергосбережения / Ю. В. Кузнецов, С. В. Федорова. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 356 с.
4. Молодежникова, Л. И. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / Л. И. Молодежникова. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 205 с.
5. Гребеньков, А. Ж. Основные направления реализации проекта ПРООН/ГЭФ «Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь» [Электронный ресурс] / А. Ж. Гребеньков // IV Международный конф. «Энергосбережение и повышение энергоэффективности. Энергоэффективность в жилом секторе: актуальные направления и практический опыт», Минск, 17 окт. 2013 г. Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by/effbuild/download/53.pdf>. Дата доступа: 27.08.2021.

6. Хрусталева, Б. М. Расширение энергосберегающей базы в условиях централизованного теплоснабжения и доминирования энергоёмких технологий / Б. М. Хрусталева, В. Н. Романюк // Энергоэффективность. 2017. № 12. С. 20–27.
7. Жукова, И. С. Оценка снижения затрат на отопление за счет утилизации теплоты приточно-вытяжной вентиляции в офисных зданиях / И. С. Жукова, И. С. Казакова // Молодежь и системная модернизация страны: сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч. конф. студ. и молод. ученых. Курск: Университетская книга, 2017. С. 293–296.
8. Игнаткин, И. Ю. Оптимизация эффективности утилизации теплоты воздушно-воздушного рекуператора / И. Ю. Игнаткин // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2018. Т. 83, № 1. С. 34–39. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-1-34-39>.
9. Тябина, Д. А. Приточно-вытяжная система вентиляции с рекуперацией тепла как способ энергосбережения / Д. А. Тябина, П. Е. Манохин // Современные научные исследования и разработки. 2018. Т. 1, № 12. С. 587–591.
10. Определение влияния установки для рекуперации тепла на эффективность и стоимость механической вентиляции / Е. О. Чеботарева [и др.] // Студент и наука. 2020. Т. 14, № 3. С. 65–71.
11. Костуганов, А. Б. Исследование эффективности утилизации теплоты в рекуперативных теплообменниках установок автономной вентиляции / А. Б. Костуганов // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 1. С. 36–46. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.01.6>.
12. Зафатаев, В. А. Термодинамическое обоснование применения системы приточно-вытяжной вентиляции зданий с утилизацией теплоты удаляемого воздуха в условиях ее работы при низких температурах наружного воздуха [Электронный ресурс] / В. А. Зафатаев, С. В. Ланкович, А. С. Лапезо // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электрон. сб. ст. II Междунар. науч. конф., Новополюк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет; под ред. Л. М. Парфеновой. Новополюк: Полоц. гос. ун-т, 2020. С. 499–513. Режим доступа: <https://elib.psu.by/handle/123456789/25549>.
13. Устройство тепловой вентиляции здания: пат. ВУ 22969 / В. И. Липко, В. А. Зафатаев, С. В. Ланкович. Опубл. 30.06.2020.
14. Фиалко, И. Ф. Энергоэффективность систем утепления наружных стен зданий и сооружений с вентилируемыми воздушными прослойками / И. Ф. Фиалко, А. С. Стаценко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2009. № 3. С. 82–87.
15. Протасевич, А. М. Аэродинамический расчет вентилируемых фасадных систем зданий со сплошными экранами / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Жилищное строительство. 2011. № 7. С. 37–40.
16. Ольшевский, В. Я. Энергоэффективность навесных вентилируемых фасадов / В. Я. Ольшевский, А. Е. Донцова, А. В. Калинина // AlfaBuild. 2019. Т. 10, № 3. С. 48–58.
17. Попова, Е. Е. Повышение энергоэффективности домов с помощью навесных вентилируемых фасадов / Е. Е. Попова, А. Е. Городилова, М. И. Куколев // Ростовский научный журнал. 2017. № 12. С. 367–378.
18. Емельянова, В. А. Оптимизированная конструкция навесного вентилируемого фасада / В. А. Емельянова, Д. В. Немова, Д. Р. Мифтахова // Инженерно-строительный журнал. 2014. Т. 50, № 6. С. 53–66.
19. Немова, Д. В. Интегральные характеристики термогравитационной конвекции в воздушной прослойке навесных вентилируемых фасадов / Д. В. Немова // Инженерно-строительный журнал. 2013. Т. 37, № 2. С. 24–36.
20. Петриченко, М. Р. Гидравлически оптимальная вентилируемая щель / М. Р. Петриченко, М. В. Петрович, Е. Б. Явтушенко // Инженерно-строительный журнал. 2013. Т. 37, № 2. С. 35–40.
21. Явтушенко, Е. Б. Основы гидравлического расчета навесных вентилируемых фасадов / Е. Б. Явтушенко // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. Т. 7, № 2. С. 55–61.
22. Liu, L. Simulation Study of an Innovative Ventilated Facade Utilizing Indoor Exhaust Air / L. Liu, Z. Yu, H. Zhang // Energy Procedia. 2017. Vol. 121. P. 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.009>.
23. Experimental and Numerical Studies to Assess the Energy Performance of Naturally Ventilated PV Facade Systems / M. Shahrestani [et al.] // Solar Energy. 2017. Vol. 147. P. 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.034>.
24. Theodosiou, T. Analysis of the Thermal Bridging Effect on Ventilated Facades / T. Theodosiou, K. Tsikaloudaki, D. Bikas // Procedia Environmental Sciences. 2017. Vol. 38. P. 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.121>.
25. Повышение энергоэффективности зданий при условии утилизации тепла вытяжного воздуха [Электронный ресурс] / П. С. Хужаев [и др.] // Бюллетень науки и практики. 2017. Т. 16, № 3. С. 57–63. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28856245>. Дата доступа: 21.10.2021.
26. Mandapati, M. J. K. Thermodynamic Performance Evaluation of an Air-Air Heat Pipe Heat Exchanger / M. J. K. Mandapati, K. S. Chandra, G. S. Narayan // Thermal Science. 2014. Vol. 18, No 4. P. 1343–1353. <https://doi.org/10.2298/tsci121214123k>.
27. Утилизация теплоты вытяжного воздуха в перекрестном рекуператоре / С. М. Анисимов [и др.] // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2014. Т. 151, № 7. С. 79–83.
28. Зыков, А. П. Повышение энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования общественных зданий за счет использования технологии утилизации тепла вытяжного воздуха / А. П. Зыков, А. В. Барков // Высокие технологии и инновации в науке: сб. избран. ст. Междунар. науч. конф., Санкт-Петербург, 28 мая 2020 г. СПб., 2020. С. 160–166.
29. Овчинников, Ю. В. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / Ю. В. Овчинников, О. К. Григорьева, А. А. Францева. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 258 с.
30. Тарифы на тепловую энергию для физических лиц [Электронный ресурс] // РУП Витебскэнерго. Режим доступа: <https://www.vitebsk.energo.by/media/uploads/2021/01/13/01012021-.pdf>. Дата доступа: 27.08.2021.
31. Пиир, А. Э. Пути снижения нормативных теплопотерь в жилых зданиях / А. Э. Пиир, О. А. Козак, В. Б. Кунтыш // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 2. С. 113–118. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-113-118>.
32. Борухова, Л. В. Нормирование воздухообмена в помещениях и энергоэффективность жилых зданий / Л. В. Борухова, А. С. Шибек // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 4. С. 306–313. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-306-313>.
33. Зафатаев, В. А. Оценка эффективности организованной приточно-вытяжной вентиляции многоэтажного здания в условиях загрязненного атмосферного воздуха крупных городов [Электронный ресурс] / В. А. За-

- фатаев, С. В. Ланкович // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Респ. науч.-техн. конф., г. Минск, 20–21 мая 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. Минск, 2021. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/96022>.
34. Бессонный, А. Н. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Б. Кунтыш. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
 35. Маньковский, О. Н. Теплообменная аппаратура химических производств / О. Н. Маньковский, А. Р. Толчинский, М. В. Александров. Л.: Химия, 1976. 369 с.
 36. Ганжа, В. Л. Основы эффективного использования энергоресурсов: теория и практика энергосбережения / В. Л. Ганжа. Минск: Белор. наука, 2007. 451 с.
 37. Серии домов и планировки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tipdoma.com/serii-domov-belarus/>. Дата доступа: 11.11.2017.
 38. Дячек, П. И. Моделирование микроклимата отапливаемых помещений / П. И. Дячек, А. Э. Захаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2009. № 2. С. 34–47.
 39. Сазонов, Э. В. Вентиляция общественных зданий / Э. В. Сазонов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. 188 с.
 40. Русланов, Г. В. Отопление и вентиляция жилых и гражданских зданий / Г. В. Русланов, Э. Л. Ямпольский. Киев: Будивельник, 1983. 272 с.
 41. Брюханов, О. Н. Теплообмен / О. Н. Брюханов, С. Н. Шевченко. М.: Изд-во АСВ, 2005. 460 с.
 42. Фокин, В. М. Основы энергосбережения и энергоаудита / В. М. Фокин. М.: Машиностроение-1, 2006. 256 с.
 43. Лихачева, А. Е. Влияние проектных решений на энергоэффективность зданий / А. Е. Лихачева, А. Д. Лопатин // Творчество и современность. 2019. Т. 11, № 3–4. С. 53–62.
- Поступила 21.12.2021
Подписана в печать 22.02.2022
Опубликована онлайн 31.03.2022
- ## REFERENCES
1. *Energy Balance of the Republic of Belarus. Statistical Compendium*. Minsk, National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2020. 152 (in Russian).
 2. *United Nations Development Programme. Terminal Evaluation of UNDP/GEF Project: Belarus: Improving Energy Efficiency in Residential Buildings: Terminal Evaluation Report*. GEF [Global Environmental Fund] Project ID: 4228; UNDP [United Nations Development Programme] PIMS Project ID: 4290. Minsk, 2018. Available at: <http://energoeffekt.gov.by/effbuild/download/33.pdf>. (Accessed 27 August 2021) (in Russian).
 3. Kuznetsov Yu. V., Fedorova S. V. (2008) *Energy Saving Technologies and Measures in Energy Saving Systems*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 356 (in Russian).
 4. Molodezhnikova L. I. (2011) *Energy Saving in Thermal Power Engineering and Heat Technologies*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University. 205 (in Russian).
 5. Grebenkov A. Zh. Main Areas of Implementation of the UNDP/GEF Project “Improving the Energy Efficiency of Residential Buildings in the Republic of Belarus”. *IV Mezhdunar. Konf. “Energoberezhenie i Povyshenie Energoeffektivnosti. Energoeffektivnost’ v Zhilom Sektore: Aktual’nye Napravleniya i Prakticheskii Opyt”*, Minsk, 17 Okt. 2013 g. [IV International Conference “Energy Saving and Energy Efficiency Improvement. Energy Efficiency in the Residential Sector: Current Trends and Practical Experience”, Minsk, Octob. 17, 2013]. Available at: <http://energoeffekt.gov.by/effbuild/download/53.pdf>. (Accessed 27 August 2021) (in Russian).
 6. Khroustalev B. M., Romanyuk V. N. (2017) Expansion of the Energy-Saving Base in the Context of District Heating and the Dominance of Energy-Intensive Technologies. *Energoeffektivnost’ [Energy Efficiency]*, (12), 20–27 (in Russian).
 7. Zhukova I. S., Kazakova I. S. (2017) Assessment of Reducing Heating Costs by Utilizing the Heat of Supply and Exhaust Ventilation in office Buildings. *Molodezh’ i Sistemnaya Modernizatsiya Strany: Sb. Nauch. St. 2-i Mezhdunar. Nauch. Konf. Stud. i Molod. Uchenykh [Youth and Systemic Modernization of the Country: Collection of Scientific Papers of the 2nd International Scientific Conference of Students and Young Scientists]*. Kursk, Universitetskaya Kniga Publ., 293–296 (in Russian).
 8. Ignatkin I. Yu. (2018) Optimization of the Heat Recovery Efficiency of an Air-to-Air Heat Exchanger. *Vestnik Federal’nogo Gosudarstvennogo Obrazovatel’nogo Uchrezhdeniya Vysshego Professional’nogo Obrazovaniya “Moskovskii Gosudarstvennyi Agroinzhenernyi Universitet imeni V. P. Goryachkina” = Vestnik of Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University named after V. P. Goryachkin”*, 83 (1), 34–39. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-1-34-39> (in Russian).
 9. Tyabina D. A., Manokhin P. E. (2018) Supply and Exhaust Ventilation System with Heat Recovery as a Way to Save Energy. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Razrabotki [Modern Research and Development]*, 1 (12), 587–591 (in Russian).
 10. Chebotareva E. O., Anikin E. N., Korobova M. M., Martynov E. N. (2020) Determination of the Influence of the Installation for Heat Recovery on the Efficiency and Cost of Mechanical Ventilation. *Student i Nauka [Student and Science]*, 14 (3), 65–71 (in Russian).
 11. Kostuganov A. B. (2020) Study of the Efficiency of Heat Utilization in Recuperative Heat Exchangers of Autonomous Ventilation Installations. *Gradostroitelstvo i Arkhitektura = Urban Construction and Architecture*, 10 (1), 36–46. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.01.6> (in Russian).
 12. Zafataev V. A., Lankovich S. V., Lapezo A. S. (2020) Thermodynamic Substantiation of the Use of the Supply-and-Exhaust Ventilation System of Buildings with the Utilization of the Heat of the Removed Air in the Conditions of its Operation at Low Outdoor Temperatures. *Arkhitekturno-Stroitel’nyi Kompleks: Problemy, Perspektivy, Innovatsii: Elektron. Sb. St. II Mezhdunar. Nauch. Konf., Novopolotsk, 28–29 Noyab. 2019 g. [Architectural and Construction Complex: Problems, Prospects, Innovations: Electronic Collection of Papers of the II International Scientific Conference, Novopolotsk, Novem. 28–29, 2019]*. Polotsk, Polotsk State University; Edited by L. M. Parfenova. Novopolotsk, 499–513 (in Russian).
 13. Lipko V. I., Zafataev V. A., Lankovich S. V. (2020) *Thermal Ventilation Device*. Patent BY No 22969 (in Russian).
 14. Fialko I. F., Statsenko A. S. (2009) Power Efficiency of Systems Applied for Heating Building and Structure External Walls With Ventilated Air Spaces. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob’edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, (3), 82–87 (in Russian).

15. Protasevich A. M., Krutilin A. B. (2011) Aerodynamic Calculation of Ventilated Facade Systems of Buildings with Solid Screens. *Zhishchnoe Stroitelstvo = Housing Construction*, (7), 37–40 (in Russian).
16. Olshevsky V. Ya., Dontsova A. E., Kalinina A. V. (2019) Energy Efficiency of Hinged Ventilated Facades. *AlfaBuild*, 10 (3), 48–58 (in Russian).
17. Popova E. E., Gorodilova A. E., Kukolev M. I. (2017) Improving the Energy Efficiency of Houses Using Hinged Ventilated Facades. *Rostovskii Nauchnyi Zhurnal [Rostov Scientific Journal]*, (12), 367–378 (in Russian).
18. Emelyanova V. A., Nemova D. V., Miftakhova D. R. (2014) Optimized Design of a Hinged Ventilated Façade. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, 50 (6), 53–66 (in Russian).
19. Nemova D. V. (2013) Integral Characteristics of Thermo-gravitational Convection in the Air Gap of Hinged Ventilated Facades. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, 37 (2), 24–36 (in Russian).
20. Petrichenko M. R., Petrochenko M. V., Yavtushenko E. B. (2013) Hydraulically Optimal Ventilated Slot. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, 37 (2), 35–40 (in Russian).
21. Yavtushenko E. B. (2013) Fundamentals of Hydraulic Calculation of Suspended Ventilated Facades. *Stroitelstvo Unikalnykh Zdanii i Sooruzheniy = Construction of Unique Buildings and Structures*, 7 (2), 55–61 (in Russian).
22. Liu L., Yu Z., Zhang H. (2017) Simulation Study of an Innovative Ventilated Façade Utilizing Indoor Exhaust Air. *Energy Procedia*, 121, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.009>.
23. Shahrestania M., Yaoa R., Essaha E., Shaoa L., Oliveirab A. C., Hepbaslic A., Biyike E., del Cañod T., Ricod E., Lechónd J. L. (2017) Experimental and Numerical Studies to Assess the Energy Performance of Naturally Ventilated PV Façade Systems. *Solar Energy*, 147, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.034>.
24. Theodosiou T., Tsikaloudaki K., Bikas D. (2017) Analysis of the Thermal Bridging Effect on Ventilated Facades. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.121>.
25. Khuzhaev P. S., Nazarov R. S., Alimardonov A. B., Sul-tonmamadov Kh. P. (2017) Improving the Energy Efficiency of Buildings under the Condition of Utilizing the Heat of Exhaust Air. *Byulleten Nauki i Praktiki [Bulletin of Science and Practice]*, 16 (3), 57–63. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28856245>. (Accessed: 21 October 2021) (in Russian).
26. Mandapati M. J. K., Chandra K. S., Narayan G. S. (2014) Thermodynamic Performance Evaluation of an Air-Air Heat Pipe Heat Exchanger. *Thermal Science*, 18 (4), 1343–1353. <https://doi.org/10.2298/tsci121214123k>.
27. Anisimov S. M., Vasil'ev V. F., Edlikovskii A., Pandelidis D. (2014) Extract Air Heat Recovery in a Cross-Flow Heat Exchanger. *Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie [Plumbing, Heating, Air Conditioning]*, 151 (7), 79–83 (in Russian).
28. Zykov A. P., Barkov A. V. (2020) Increasing the Energy Efficiency of Ventilation and Air Conditioning Systems in Public Buildings Through the Use of the Exhaust Air Heat Recovery Technology. *Vysokie Tekhnologii i Innovatsii v Nauke: Sb. Izbran. St. Mezhdunar. Nauch. Konf., Sankt-Peterburg, 28 Maya 2020 g. [High Technologies and Innovations in Science: Collection of Selected Papers of the International Scientific Conference]*. Saint-Petersburg, 160–166 (in Russian).
29. Ovchinnikov Yu. V., Grigorieva O. K., Frantseva A. A. (2015) *Energy Saving in Heat Power Engineering and Heat Technologies*. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 258 (in Russian).
30. Heat Energy Tariffs for Individuals. *Republican Unitary Enterprise Vitebskenergo*. Available at: <https://www.vitebsk.energo.by/media/uploads/2021/01/13/01012021-.pdf>. (Accessed 27 August 2021) (in Russian).
31. Piir A. E., Kozak O. A., Kuntyshev V. B. (2017) Method for Decrease of Standard Heat Losses in Residential Buildings. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (2), 113–118. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-113-118> (in Russian).
32. Borukhava L. V., Shybeka A. S. (2018) Introduction of Norms for Air Exchange in Rooms and Energy Efficiency of Residential Buildings. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (4), 306–313. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-306-313> (in Russian).
33. Zafataev V. A., Lankovich S. V. (2021) Evaluation of the Effectiveness of Organized Supply and Exhaust Ventilation of a Multi-Storey Building in the Conditions of Polluted Atmospheric Air in Large Cities. *Innovatsionnye Tekhnologii v Vodnom, Kommunal'nom Khozyaistve i Vodnom Transporte: Materialy Resp. Nauch.-Tekhn. Konf., g. Minsk, 20–21 Maya 2021 g. [Innovative Technologies in Water, Utilities and Water Transport: Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference, Minsk, May 20–21, 2021]*. Minsk, 13–17 (in Russian).
34. Bessonny A. N., Dreitser G. A., Kuntyshev V. B. (1996) *Fundamentals of Calculation and Design of Heat Exchangers for Air Cooling*. Saint Petersburg, Nedra Publ., 512 (in Russian).
35. Mankovsky O. N., Tolchinsky A. R., Aleksandrov M. V. (1976) *Heat Exchange Equipment of Chemical Production*. Leningrad, Khimiya Publ., 369 (in Russian).
36. Ganzha V. L. (2007) *Fundamentals of Efficient Use of Energy Resources: Theory and Practice of Energy Saving*. Minsk, Belorusskaya Nauka Publ., 451 (in Russian).
37. *Series of Houses and Layout*. Available at: <http://tipdoma.com/serii-domov-belarus/>. (Accessed 11 November 2017) (in Russian).
38. Diachek P. I., Zakharevich A. E. (2009) Simulation of Micro-Climate in Heated Buildings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, (2), 34–47 (in Russian).
39. Sazonov E. V. (1991) *Ventilation of Public Buildings*. Voronezh, Voronezh State University Publ., 188 (in Russian).
40. Ruslanov G. V., Yampolsky E. L. (1983) *Heating and Ventilation of Residential and Civil Buildings*. Kiev, Budivelnik Publ., 272 (in Russian).
41. Bryukhanov O. N., Shevchenko S. N. (2005) *Heat and Mass Transfer*. Moscow, ASV Publ., 460 (in Russian).
42. Fokin V. M. (2006) *Fundamentals of Energy Saving and Energy Audit*. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 256 (in Russian).
43. Likhacheva A. E., Lopatin A. D. (2019) Influence of Design Solutions on the Energy Efficiency of Buildings. *Tvorchestvo i Sovremennost [Creativity and Modernity]*, 11 (3–4), 53–62 (in Russian).

Received: 21.12.2021

Accepted: 22.02.2022

Published online: 31.03.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-129-133>

УДК 624.071.3

Оптимизация прямоугольных шарнирно опертых железобетонных гладких и ребристых плит методом сокращения ресурсов

Кандидаты техн. наук О. Л. Вербицкая¹⁾, Л. И. Шевчук¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Рассмотрена задача оптимизации шарнирно опертых железобетонных прямоугольных гладких и ребристых плит. Статический расчет плит выполнен с использованием метода конечных элементов. Модель построена из прямоугольных конечных элементов, содержащих по четыре узла и имеющих двенадцать степеней свободы. Нагрузка представлена в виде узловых вертикальных сил. Для учета нелинейности деформирования железобетона конечные элементы приняты как неоднородные многослойные пластины. Модуль упругости изменялся по гиперболической зависимости. Определение напряженно-деформированного состояния выполнено итерационным способом. Для оптимизации использован метод сокращения ресурсов по прочности, жесткости и раскрытию трещин с градиентным спуском по границе допустимой области. В качестве целевых функций приняты стоимость материала, затраченного на изготовление плиты, и объем бетона. Поставлены ограничения по прочности, жесткости и ширине раскрытия трещин. Путем сканирования установлены границы допустимой области поиска оптимального решения, имеющие криволинейное очертание. По результатам расчета получены траектории движения поиска оптимального решения. Приведены примеры и найдены оптимальные решения при различных стартовых точках. Установлено, что для принятых условий задачи экстремальные точки располагаются вблизи границ допустимой области. Скорость градиентного спуска и расположение стартовых точек не оказывают существенного влияния на результаты. В связи с тем что целевая функция может иметь несколько минимумов, предложен способ поиска глобального минимума предварительным сканированием и анализом значений экстремумов. Подтверждено, что применяемый метод обеспечивает стабильность оптимального решения.

Ключевые слова: оптимизация, железобетон, прямоугольные плиты, градиентный спуск, сокращение ресурсов, прочность, жесткость, конечные элементы

Для цитирования: Вербицкая, О. Л. Оптимизация прямоугольных шарнирно опертых железобетонных гладких и ребристых плит методом сокращения ресурсов / О. Л. Вербицкая, Л. И. Шевчук // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 129–133. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-129-133>

Optimization of Rectangular Articulated Reinforced Concrete Smooth and Ribbed Slabs Using Resource Reduction Method

O. L. Verbitskaya¹⁾, L. I. Shevchuk¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers the optimization problem of hinged reinforced concrete rectangular smooth and ribbed slabs. The static calculation of the slabs has been performed while using the finite element method. The model is built from rectangular finite elements containing four nodes each and having twelve degrees of freedom. The load is presented in the form of nodal vertical forces. To take into account the nonlinearity of the deformation of reinforced concrete, the finite elements

Адрес для переписки

Шевчук Леонид Иванович
Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-04
shevchuk4848@yandex.ru

Address for correspondence

Shevchuk Leonid I.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-04
shevchuk4848@yandex.ru

are taken as inhomogeneous multilayer plates. The modulus of elasticity changed according to the hyperbolic dependence. The determination of the stress-strain state has been carried out by the iterative method. For optimization, a method has been used to reduce resources for strength, stiffness, and crack opening with gradient descent along the boundary of the allowable area. The cost of the material spent on the manufacture of the slab and the volume of concrete are taken as objective functions. Restrictions on strength, stiffness and width of cracks are set. By scanning, the boundaries of the admissible search area for the optimal solution are set; the boundary of this region has a curvilinear outline. According to the results of the calculation, the trajectories of the search for optimal solution are obtained. Examples are given and optimal solutions are found for various starting points. It has been established that for the accepted conditions of the problem, the extreme points are located near the boundaries of the admissible region. The speed of gradient descent and the location of the starting points do not significantly affect the results. Due to the fact that the objective function can have several minima, a method is proposed to search for a global minimum by preliminary scanning and analysis of extrema values. It is confirmed that the applied method ensures the stability of the optimal solution.

Keywords: optimization, reinforced concrete, rectangular slabs, gradient descent, resource reduction, strength, rigidity, finite elements

For citation: Verbitskaya O. L., Shevchuk L. I. (2022) Optimization of Rectangular Articulated Reinforced Concrete Smooth and Ribbed Slabs Using Resource Reduction Method. *Science and Technique*. 21 (2), 129–133. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-129-133> (in Russian)

Введение

В промышленном строительстве при установке технологического оборудования часто требуется отступать от типовых конструкций и устраивать на отдельных участках монолитные перекрытия. При этом нужно разрабатывать конструкцию монолитных плит, выбирая варианты с наличием ребер или их отсутствием. Армирование плит, размеры их ребер и толщина должны соответствовать требованиям и рекомендациям строительных норм Республики Беларусь. Установлено, что жесткость железобетонных плит нелинейно зависит от нагрузки [1]. Согласно исследованиям, железобетонные плиты деформируются нелинейно, что сказывается на характере распределения внутренних сил в них. Образование и развитие трещин тоже оказывают влияние на величину прогибов плит.

С помощью подбора толщины плиты и высоты ребер можно получить оптимальную конструкцию. Для этого в статье использован метод оптимизации сокращения ресурсов и градиентного спуска по границе [2, 3]. Рассмотрены два примера по оптимизации прямоугольных железобетонных плит.

Статический расчет плиты

Статический расчет железобетонной плиты выполнен методом конечных элементов [4, 5]. Расчетная модель плиты построена из совокупности несовместных прямоугольных конечных элементов с четырьмя узлами и двенадцатью степенями свободы. Конечные элементы связаны друг с другом только в узлах, и поэтому яв-

ляются несовместными [5]. Плита шарнирно опирается по контуру и равномерно нагружена распределенной нагрузкой, которая представлена системой вертикальных узловых сил.

Известно, что железобетон при изгибе деформируется по нелинейному закону, имеющему сложный вид. В связи с этим конечные элементы представлены в виде m горизонтальных слоев, на участках которых модули упругости уточняются в зависимости от получаемых нормальных напряжений. Статический расчет плиты выполнен итерационно с применением релаксации решений.

Оптимизационный расчет

Для поиска экономически выгодной плиты применен метод оптимизации сокращением ресурсов с градиентным спуском по границе [6, 7]. В качестве целевой функции взята стоимость материалов (бетона и арматуры), затраченных на изготовление плиты. Оптимизацию выполняли в трехмерном пространстве, координатами которого являлись толщина самой полки t , высота ребра h и площадь арматуры A_s . То есть переменные t , h , A_s – параметры оптимизации [8]. Требуется минимизировать функцию $C(t, h, A_s)$, которая в случае наличия двух ребер может быть представлена как линейная следующего вида:

$$C(t, h, A_s) = C_t a (bt + 2b_r h) + 2C_{as} A_s a, \quad (1)$$

где C_t , C_{as} – стоимость бетона и арматуры; a , b – размер плиты в плане; t , h , b_r – толщина плиты, высота и ширина ребер; A_s – площадь арматуры по поперечному сечению ребра.

Вводили ограничения на параметры оптимизации:

$$t_{\min} \leq t \leq t_{\max}; \quad h_{\min} \leq h \leq h_{\max}; \quad A_{s,\min} \leq A_s, \quad (2)$$

где t_{\min} , t_{\max} , h_{\min} , h_{\max} , $A_{s,\min}$ – минимально и максимально допустимые значения толщины плиты, высоты ребра и площади продольной арматуры.

Также ставились ограничения по прочности бетона

$$R_u - \sigma_{beq} = 0, \quad (3)$$

где R_u – расчетное сопротивление бетона плиты; σ_{beq} – максимальное эквивалентное напряжение в бетоне.

Ограничение по прочности продольной арматуры

$$R_s - \sigma_{seq} = 0, \quad (4)$$

где R_s – расчетное сопротивление арматуры плиты; σ_{seq} – максимальное эквивалентное напряжение в арматуре.

Ограничение по жесткости плиты (прогибам)

$$W_{\max} - W_{\lim} = 0, \quad (5)$$

где W_{\max} , W_{\lim} – максимальный и максимально допустимый прогибы плиты.

Ограничение по ширине раскрытия трещин

$$w_{\max} - w_{\lim} = 0, \quad (6)$$

где w_{\max} , w_{\lim} – максимальная и максимально допустимая ширина раскрытия трещин.

Целевая функция $C(t, h, A_s)$ представляет собой плоскость в трехмерном пространстве, построенном на параметрах оптимизации t , h , A_s . Условия ограничения не могут быть выражены в явном виде через t , h , A_s , так как расчет плиты выполняли численным методом. Поэтому для поиска оптимального решения использовали метод градиентного спуска [9, 10]

$$x_i^{k+1} = x_i^k - \frac{a_i s}{\sqrt{\sum_{j=1}^n a_j^2}}, \quad (7)$$

где x_i^k – значение i -го параметра оптимизации, полученного на k -й итерации; k – номер итера-

ции; a_i – коэффициент полинома целевой функции; s – шаг продвижения поисковой точки.

Для выполнения оптимального расчета плиты была составлена компьютерная программа Progress. В качестве примера выполнили оптимизационный расчет квадратной шарнирно опертой гладкой железобетонной плиты (рис. 1). Плита армирована сеткой, размеры которой и толщину определяла программа Progress в процессе оптимизационного расчета. При этом учитывалась нелинейность деформирования железобетона при изгибе.

Для расчета плиты принимали следующие исходные данные:

- размеры плиты в плане $a \times b = 5,2 \times 5,2$ м; толщина защитного слоя $C_z = 25$ мм; нижний предел толщины плиты $h_{\min} = 60$ мм; нижний предел площади арматуры $A_{s,\min} = 50$ мм²; модуль упругости арматурной стали $E_s = 200$ ГПа;
- модуль упругости бетона $E_b = 38$ ГПа; коэффициент поперечной деформации бетона $\nu = 0,18$; интенсивность равномерно распределенной нагрузки $p = 4,0$ кН/м²; стоимость бетона $C_t = 78$ руб./м³ и арматурной сетки $C_{as} = 2627$ руб./т; допустимый прогиб плиты $W_{\lim} = 25$ мм; допустимая ширина раскрытия трещин $w_{\lim} = 0,40$ мм; коэффициент безопасности по бетону $k_b = 1,5$.

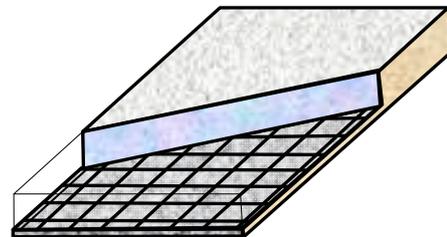


Рис. 1. Сплошная прямоугольная плита, армированная сеткой

Fig. 1. Solid rectangular slab reinforced with mesh

Оптимизационный расчет по программе Progress показал следующие результаты. При нагрузке $p = 4,0$ кН/м² и площади поперечного сечения арматурной сетки $A_s = 80$ мм²/м требуемая толщина плиты в оптимальном варианте 150 мм, что соответствует арматурной сетке 5Вр1/100/5Вр1/100. Стоимость материалов, затраченных на изготовление плиты, составила 405 руб.

Для оценки надежности примененного метода оптимизации с сокращением ресурсов рас-

смотрена задача оптимизации квадратной плиты с различной толщиной ее участков (рис. 2).

Пусть размер стороны квадратной плиты 6,2 м, модуль упругости $E = 20$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,18$. Средняя нагрузка составляет 10 кН/м^2 и сосредоточена на ребрах плиты. Приняты следующие ограничения: линейные $h_{\text{lim}} = 11$ см, по прочности $R = 8,4$ МПа, по жесткости $W_{\text{lim}} = 0,7$ мм. Ребра плиты армированы каркасом с двумя рабочими стержнями диаметром 12 мм каждый, а полка – сеткой 5Вр1/100/5Вр1/100.

Поскольку ставилась задача, используя метод сокращения ресурсов, оптимизировать квадратную плиту переменной жесткости по ее объему $V(h_1, h_2)$, сканирование выполняли только по двум параметрам h_1 и h_2 . Третий параметр – арматура – принимали, как консервативный, и в процессе поиска оптимального решения не изменяли. При этом учитывали нелинейный закон деформирования материала плиты [1]. Модуль упругости ставили в зависимость от относительной линейной деформации ε

$$E(\varepsilon) = \frac{A}{\sqrt[2]{\left(\frac{A}{2E_0}\right)^2 + A\varepsilon}}, \quad (8)$$

где A – коэффициент, $A = \frac{4E_0^2 E_s^2 \varepsilon_s}{E_0^2 - E_s^2}$; E_0 – начальный модуль упругости; E_s – фиксированный модуль упругости при относительной продольной деформации ε_s .

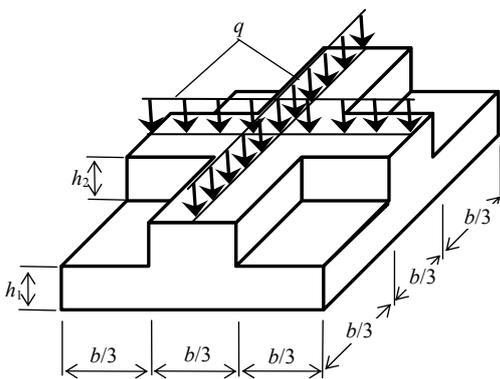


Рис. 2. Прямоугольная плита переменной толщины

Fig. 2. Rectangular plate of variable thickness

Расчет выполняли по программе Progress. В результате сканирования получены границы ограничений по прочности $\sigma = R$ и жесткости $W = W_{\text{lim}}$. Также получены трассы поиска

оптимального решения при старте из различных точек допустимой области (рис. 3).

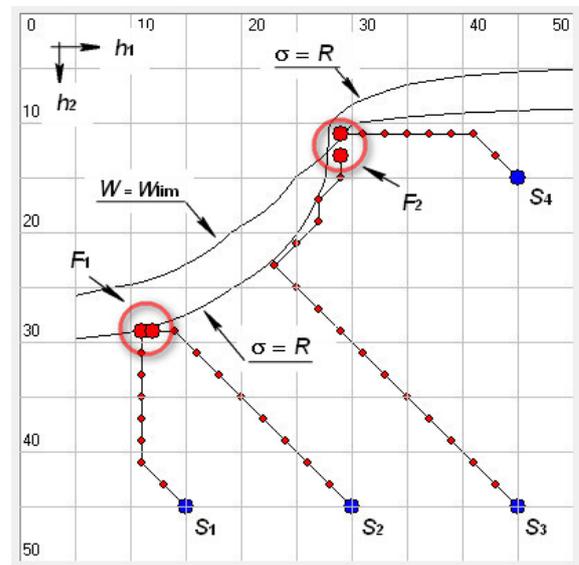


Рис. 3. Результаты сканирования и трассы поиска оптимального решения по программе Progress

Fig. 3. Scan results and traces of the search for the optimal solution using the Progress program

Сканирование показало (рис. 3), что допустимая область ограничена и по жесткости $W = W_{\text{lim}}$, и прочности $\sigma = R$ и имеет достаточно сложный вид. При этом обе границы пересекаются – на одном участке границу определяет прочность $\sigma = R$, а на другом – жесткость $W = W_{\text{lim}}$ (рис. 3). Как показали расчеты в Progress, финал поисков расположен в точках F_1 и F_2 . Две траектории S_1-F_1 и S_2-F_1 заканчивались в одной финальной точке F_1 , которая соответствует одному из оптимальных решений с параметрами $h_1 = 11$ см и $h_2 = 29$ см при объеме бетона $10,42 \text{ м}^3$. Две другие траектории поиска S_3-F_2 и S_4-F_2 заканчивались в другой финальной точке F_2 , соответствующей оптимальному решению с параметрами оптимизации $h_1 = 29$ см и $h_2 = 12$ см при объеме бетона $13,71 \text{ м}^3$. В первом случае поиск оптимального решения останавливался на границе $\sigma = R$, во втором – на границе $W = W_{\text{lim}}$ (рис. 3). Второе решение исключается, так как не приводит к абсолютному минимуму, а первое может быть принято как абсолютный минимум.

По значениям, полученным во втором примере, видно, что сканирование позволяет определить примерное положение абсолютного экстремума. В результате анализа определяется количество стартовых точек, которые должны

обеспечивать прохождение трассы поиска через найденные зоны и уточнение оптимального решения. Данный метод надежно гарантирует определение количества экстремумов целевой функции $V(h_1, h_2)$ и дает возможность получения абсолютного минимума. Такой способ будет эффективным и при решении задач с большим количеством параметров оптимизации.

ВЫВОДЫ

1. Построена конечно-элементная модель шарнирно опертой прямоугольной железобетонной плиты с учетом нелинейности деформирования бетона и образования трещин. Для получения статического решения использованы конечно-элементная модель и итерационный метод с релаксацией.

2. Выполнена задача оптимизации прямоугольной поперечно загруженной железобетонной плиты. В качестве целевой функции принимали стоимость плиты и объем бетона. Для получения решения использовали метод оптимизации сокращения ресурсов и градиентного спуска по границе.

3. На двух примерах рассмотрены оптимизация железобетонной плиты и сканирование области поиска решения. Приведен анализ трасс поиска решения при различных стартовых точках. Даны рекомендации поиска глобального минимума и подтверждена надежность предлагаемого метода оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вербицкая, О. Л. Оптимизация физически нелинейных прямоугольных пластин кусочно-постоянного сечения / О. Л. Вербицкая. Минск: БНТУ, 2011. 21 с.
2. Муймаров, К. В. Оптимизация железобетонных плит с выбором структур армирования / К. В. Муймаров. Брянск, 2019. 24 с.
3. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций / С. Ф. Клованич, Д. И. Безушко. Одесса: Изд-во ОНМУ, 2009. 89 с.
4. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А. С. Городецкий [и др.]; под общ. ред. А. С. Городецкого. М.: Транспорт, 1981. 143 с.
5. Секулович, М. Метод конечных элементов / М. Секулович. М.: Стройиздат, 1993. 664 с.
6. Вербицкая, О. Л. Оптимизация многослойной плиты на упругом основании методом сокращения ресурсов / О. Л. Вербицкая, Л. И. Шевчук // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение: материалы Международ. науч.-техн. конф. / редкол. С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. Минск: БНТУ, 2020. С. 286–289.
7. Габасов, Р. Методы оптимизации / Р. Габасов, Ф. М. Кириллова. Минск: Изд-во БГУ, 1975. 280 с.
8. Шевчук, Л. И. Оптимизация центрально загруженной прямоугольной плиты на упругом основании /

- Л. И. Шевчук, О. Л. Вербицкая // Автомобильные дороги, мосты и подземные сооружения: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию Белор. нац. техн. ун-та, 21–22 окт. 2010 г. / отв. ред. И. И. Леонович [и др.]. Минск: БНТУ, 2010. Ч. 1. С. 373–378.
9. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. М.: Наука, 1970. 720 с.
10. Филимонова, Е. А. Методика поиска оптимальных параметров железобетонных конструкций с учетом риска отказа / Е. А. Филимонова // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 128–133.

Поступила 03.11.2021

Подписана в печать 11.01.2022

Опубликована онлайн 31.03.2022

REFERENCES

1. Verbitskaya O. L. (2011) *Optimization of Physically Non-linear Rectangular Plates of Piecewise Constant Section*. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 21 (in Russian).
2. Muymarov K. V. (2019) *Optimization of Reinforced Concrete Slabs with the Choice of Reinforcement Structures*. Bryansk. 24 (in Russian).
3. Klovaniich S. F., Bezushko D. I. (2009) *Finite Element Method in Nonlinear Calculations of Spatial Reinforced Concrete Structures*. Odessa, Odessa National Maritime University Publ., 89 (in Russian).
4. Gorodetskii A. S., Zovoritskii V. I., Lantukh-Lyashchenko A. I., Rasskazov A. O. (1981) *Finite Element Method in the Design of Transport Facilities*. Moscow, Transport Publ., 143 (in Russian).
5. Sekulovich M. (1993) *Finite Element Method*. Moscow, Stroiizdat Publ., 664 (in Russian).
6. Verbitskaya O. L., Shevchuk L. I. (2020) Optimization of a Multilayer Slab on an Elastic Foundation by Reducing Resources. *Dorozhnoe Stroitel'stvo i ego Inzhenernoe Obespechenie: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. [Road Construction and its Engineering Support: Proceedings of International Scientific and Technical Conference]*. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 286–289 (in Russian).
7. Gabasov R., Kirillova F. M. (1975) *Optimization Methods*. Minsk, Publishing House of Belarusian State University. 280 (in Russian).
8. Shevchuk L. I., Verbitskaya O. L. (2010) Optimization of a Centrally Loaded Rectangular Slab on an Elastic Foundation. *Avtomobil'nye Dorogi, Mosty i Podzemnye Sooruzheniya: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Posvyashch. 90-letiyu Belor. Nats. Tekhn. Un-ta, 21–22 Okt. 2010 g. Ch. 1* [Highways, Bridges and Underground Structures: Proceedings of International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 90th Anniversary of the Belarusian National Technical University, Oct. 21–22, 2010. Part 1]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 373–378 (in Russian).
9. Korn G., Korn T. (1970) *Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers*. Moscow, Nauka Publ., 720 (in Russian).
10. Filimonova E. A. (2012) Technique for Finding Optimal Parameters of Reinforced Concrete Structures, Taking Into Account the Risk of Failure. *Vestnik MGSU*, (10), 128–133 (in Russian).

Received: 03.11.2021

Accepted: 11.01.2022

Published online: 31.03.2022

Использование цементогранулята в дорожном строительстве

Канд. техн. наук, доц. С. И. Зиневич¹⁾, асп. А. К. Каюмов¹⁾, инж. Д. М. Ковалев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Изучена возможность применения в процессе строительства, реконструкции и ремонта автомобильных дорог цементогранулята – продукта переработки старого цементобетона и мусора, образующегося при сносе зданий и сооружений. Использование вторичных материалов в дорожной отрасли – один из источников экономии природного сырья. При этом решаются экологические проблемы посредством утилизации старых отработанных материалов и конструкций. Исследованы характеристики цементогранулята, определена возможность его применения для устройства оснований под дорожные одежды, а также как заменителя щебня при изготовлении бетонных плит сборных покрытий. В первом случае использование цементогранулята эффективным является метод заклинки. Экспериментально подтверждено, что остатки цементного раствора на поверхности щебня, бывшего в употреблении, способствуют лучшему его заклиниванию, тем самым создавая более прочный слой основания. Чтобы оценить возможность применения цементогранулята как заменителя щебня для изготовления бетонных плит сборных покрытий, проведены стандартные исследования этого материала, подобран состав цементобетонной смеси, изготовлены и испытаны стандартные образцы. Результаты экспериментов показали, что использование цементогранулята для таких целей вполне допустимо. В частности, средняя прочность образцов в испытанной партии оказалась равной 45,13 МПа, а гарантируемая – 35,13 МПа, что соответствует классу бетона В35. Данные показатели демонстрируют, что применение цементогранулята вполне может быть востребовано при строительстве и реконструкции местных дорог. В настоящее время, как известно, выполняется программа по повышению транспортно-эксплуатационного уровня местных дорог, а это – около 70 тыс. км. И здесь, конечно, потребуется огромное количество дорожно-строительных материалов.

Ключевые слова: цементогранулят, основание под дорожные одежды, метод заклинки, бетонные плиты, сборные покрытия, подбор состава, цементобетонная смесь, цементобетон

Для цитирования: Зиневич, С. И. Использование цементогранулята в дорожном строительстве / С. И. Зиневич, А. К. Каюмов, Д. М. Ковалев // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 134–141. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-134-141>

Use of Cement Granulate in Road Construction

S. I. Zinevich¹⁾, A. K. Kayumov¹⁾, D. M. Kovalyov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The possibility of using cement granulate, a product of processing old cement concrete and waste generated during the demolition of buildings and structures, has been studied in the construction, reconstruction and repair of highways. The use of recycled materials in the road industry is one of the sources of saving natural raw materials. In addition, the use of waste solves environmental problems through the disposal of old waste materials and structures. Having completed the study of cement granulate, the possibility of using it for the construction of foundations for road pavements, as well as a substitute for crushed stone in the manufacture of concrete slabs of prefabricated coverings, has been determined. In the first case of using cement granulate, the wedge method is effective. It has been experimentally confirmed that the remains

Адрес для переписки

Зиневич Сергей Иванович
Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-38-81
Zinev2018@gmail.com

Address for correspondence

Zinevich Sergey I.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-38-81
Zinev2018@gmail.com

of cement mortar on the surface of used crushed stone contribute to its better wedging, thereby creating a more durable base layer. In order to assess the possibility of using cement granulate as a substitute for crushed stone for the manufacture of prefabricated concrete slab, standard studies of this material were carried out, the composition of the cement concrete mixture was selected, and standard samples were manufactured and tested. The test results have shown that the use of cement granulate for such purposes is quite acceptable. In particular, the average strength of the samples in the tested batch turned out to be 45.13 MPa and the guaranteed strength was 35.13 MPa, which corresponds to the B35 class of concrete. These indicators demonstrate that the use of cement granulate may well be in demand in the construction and reconstruction of local roads. At present, as it is known, a program is being implemented to improve the transport and operational level of local roads, and this is about 70 thousand kilometers. And here, of course, a huge amount of road construction materials will be required.

Keywords: cement granulate, bases for road pavements, wedge method, concrete slabs, prefabricated coverings, selection of composition, cement-concrete mixture, cement concrete

For citation: Zinevich S. I., Kayumov A. K., Kovalyov D. M. (2022) Use of Cement Granulate in Road Construction. *Science and Technique*. 21 (2), 134–141. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-134-141> (in Russian)

Введение

Вопросы охраны окружающей среды приобретают все большую остроту в связи с продолжающимся увеличением объема отходов производства промышленной и строительной индустрии, которые в свою очередь являются загрязнителями экологии. Учет данного фактора становится обязательным условием во всех областях деятельности человека, в том числе и в дорожном строительстве, где имеется реальная база для утилизации крупнотоннажных отходов.

Использование при выполнении дорожных строительно-ремонтных работ вторичного сырья позволяет значительно снизить затраты на их выполнение. При этом еще уменьшается негативное воздействие на окружающую среду [1–3].

Цементогранулят – продукт переработки различных дефектных или отработавших свой срок цементобетонных изделий и строительного мусора, образовавшегося при разборке зданий, бетонных покрытий автомобильных дорог и взлетно-посадочных полос аэродромов. Такое сырье в Беларуси имеется в достаточном количестве на полигонах твердых бытовых отходов, где его перерабатывают в цементогранулят [4].

Поскольку цементогранулят получают измельчением различных изделий и конструкций, в нем могут встречаться включения битого кирпича, керамической плитки, древесины. Поэтому прежде чем исследовать этот материал на пригодность к тому или иному элементу дороги, его необходимо дополнительно подготовить (очистить от возможных посторонних вклю-

чений). После предварительной подготовки цементогранулят имел вид, представленный на рис. 1



Рис. 1. Цементогранулят, используемый при испытаниях
Fig. 1. Cement granulate used in testing

Цементогранулят для устройства основания дорожного покрытия по методу заклинки

Для определения возможности использования цементогранулята вместо природного щебня из горных пород при устройстве оснований дорожных одежд по методу заклинки были определены зерновой состав и модуль крупности этого материала. Для определения зернового состава цементогранулята применяли ситовой анализ согласно ГОСТ 8269.0 [5]. После просеивания получили зерновой состав цементогранулята, приведенный в табл. 1.

Модуль крупности зерен M_k составил 2,18. Сравнив гранулометрические составы испытываемых смесей цементогранулята и его модуль крупности с требованиями нормативных документов, в частности [6], можно сделать вывод, что фракции 0–40 по своему составу аналогичны смесям с номерами С11 и С12 по [6].

Зерновой состав цементогранулята
Grain composition of cement granulate

Размер отверстий сита, мм	Частный остаток, %, цементогранулята фракции		Полный остаток, %, цементогранулята фракции	
	до 20 мм	до 40 мм	до 20 мм	до 40 мм
40	0	5,69	0	5,69
30	0	0	0	5,69
20	1,00	34,57	1,00	40,26
15	26,27	22,78	27,27	63,04
10	30,97	15,58	58,24	78,62
5	26,97	11,29	85,21	89,91
2,5	5,29	4,20	90,51	94,11
1,25	2,70	1,90	93,21	96,00
0,63	1,60	0,90	94,81	96,90
0,315	1,60	1,10	96,40	98,00
0,14	1,10	1,40	97,40	99,40
0,071	1,60	0,40	99,00	99,80
≤0,071	1,00	0,20	100,00	100,00

Вместе с тем по своим свойствам из-за наличия остатков старого раствора на поверхности зерен эти смеси должны отличаться. И совершенно очевидно, что при уплотнении такого слоя с целью его заклинки эффект должен быть иным, чем у щебня из горных пород, не бывшего в употреблении. Для подтверждения данного предположения в экспериментах для формования асфальтобетонных образцов использовали металлические цилиндры диаметром 100 мм, в которых на испытательном прессе мощностью 50 т заклинивали щебень из цементогранулята фракций 0–40, а затем таких же фракций щебень из горных пород, не бывший в употреблении. Усилие уплотнения и для одного, и для другого щебня было одинаковым. После последующего выдавливания из цилиндра заклиненного щебня при испытаниях на том же прессе было установлено, что заклиненный слой из цементогранулята требует большего усилия (на 15 %) для разрушения по сравнению со щебнем из горных пород, не бывшим в употреблении. Таким образом, при устройстве оснований по методу заклинки целесообразно применять цементогранулят.

Цементогранулят как альтернатива щебню при приготовлении бетонных смесей для плит сборных покрытий

Для того чтобы сделать заключение о возможности использования цементогранулята как

крупного заполнителя при проектировании бетонных смесей для плит сборных покрытий, выполнили стандартные испытания этого материала. Зерновой состав и модуль крупности цементогранулята определяли в первой задаче, одновременно выявляя характеристики материала: насыпную плотность, плотность зерен, пустотность и дробимость.

Насыпную плотность цементогранулята определяли путем взвешивания его определенной массы в воздушно-сухом состоянии в соответствии с п. 4.17 [5] по формуле

$$\rho_n = \frac{m_1 - m}{V},$$

где m – масса мерного цилиндра, г; m_1 – то же мерного цилиндра с цементогранулятом, г; V – объем мерного цилиндра, см³.

Результаты испытаний по определению насыпной плотности цементогранулята приведены в табл. 2.

Плотность зерен цементогранулята рассчитывали в соответствии с п. 4.16.1 [5]

$$\rho_z = \frac{m}{m_1 - m_2} \rho_v,$$

где m – масса пробы в сухом состоянии, г; m_1 , m_2 – то же в насыщенном водой состоянии на воздухе и в воде соответственно, г; ρ_v – плотность воды, г/см³.

Результаты испытаний по определению плотности зерен цементогранулята приведены в табл. 3.

Таблица 2

Определение насыпной плотности цементогранулята
Determination of bulk density of cement granulate

Наименование материала	Объем цилиндра, см ³	<i>m</i> , г	<i>m</i> ₁ , г	Насыпная плотность, г/см ³	Средняя насыпная плотность, г/см ³
Цементогранулят фракций 5–20	10000	1545	15455	1,39	1,39
			15462	1,39	

Таблица 3

Определение плотности зерен цементогранулята
Determination of grain density of cement granulate

Наименование материала	Плотность воды, г/см ³	<i>m</i> , г	<i>m</i> ₁ , г	<i>m</i> ₂ , г	Плотность зерен, г/см ³	Средняя плотность зерен, г/см ³
Цементогранулят фракций 5–20	1	1000,0	1095,3	703,4	2,551	2,55
			1093,7	701,2	2,548	

Пустотность цементогранулята (% по объему) находили расчетным путем на основании предварительно установленных значений средней плотности зерен и насыпной плотности цементогранулята в соответствии с п. 4.16.2 [5]

$$V_{\text{пор}} = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_z}\right) \cdot 100,$$

где ρ_n , ρ_z – насыпная и средняя плотность зерен цементогранулята, г/см³.

Результаты расчета пустотности цементогранулята приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета пустотности цементогранулята
Results of calculation of cement granulate voidness

Наименование материала	Насыпная плотность, г/см ³	Плотность зерен, г/см ³	Пустотность, %
Цементогранулят фракций 5–20	1,39	2,55	45,43

Дробимость цементогранулята. Дробимость щебня (гравия) определяли по степени

разрушения зерен при сжатии (раздавливании) в цилиндре в соответствии с п. 4.8 [5]. Испытание выполняли на цементогрануляте фракций 5–20. Согласно требованиям, он был рассеян на две более узкие фракции 5–10 и 10–20, каждую из которых испытывали отдельно.

Дробимость D_r определяли с точностью до 1 % по формуле

$$D_r = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100,$$

где m – масса испытываемой пробы щебня (цементогранулята), г; m_1 – то же остатка на контрольном сите после просеивания раздробленной в цилиндре пробы (цементогранулята), г.

Результаты расчета дробимости цементогранулята приведены в табл. 5.

Марка по дробимости цементогранулята фракций 5–10 и 10–20 соответствует 600. Из приведенных выше данных можно сделать вывод, что он соответствует требованиям, предъявляемым к крупному заполнителю при проектировании цементобетонной смеси [7, 8].

Таблица 5

Результаты расчета дробимости цементогранулята
Results of calculating crushability of cement granulate

Наименование материала	Контрольное сито, мм	<i>m</i> , г	<i>m</i> ₁ , г	D_r , %	Марка по дробимости
Цементогранулят фракций 5–10	1,25	317,47	256,44	19,22	600
Цементогранулят фракций 10–20	2,5	285,34	237,55	16,75	

Подбор состава цементобетона

Было принято решение подобрать состав цементобетона максимальной прочности на сжатие класса В35. Цементобетон данного класса применялся на объекте МКАД-2, требования к которому были такими, как для I категории.

Согласно [9] (Приложение А), класс бетона на сжатие соответствует В35, С28/С35. Нормативное сопротивление f_{ck} должно составлять не менее 28 МПа, гарантированная прочность бетона $f_{c.cube}^G$ – не менее 35 МПа, требуемая прочность бетона $f_{c.тр}$ при подборе состава – не менее 45 МПа.

Для подбора цементобетона использовали следующие материалы:

- цемент. В роли гидравлического вяжущего применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ДП по ГОСТ 33174 [10]. Основные физико-механические свойства цемента представлены в табл. 6;
- песок строительный, крупный, первого класса, соответствует требованиям ГОСТ 8736 [11]. Его основные физико-механические свойства представлены в табл. 7, гранулометрический состав – в табл. 8, графическое отображение – на рис. 2;
- воду, отвечает требованиям СТБ 1114 [12].

Таблица 6

Физико-механические свойства цемента
Physical and mechanical properties of cement

Наименование материала	Плотность, т/м ³		Межзерновая пустотность, %	Предел прочности, МПа		Класс прочности цемента
	насыпная	истинная		на сжатие	на изгиб	
Цемент	1,15	2,99	61,54	48,1	6,2	42,5Н

Таблица 7

Физико-механические свойства песка
Physical and mechanical properties of sand

Наименование материала	Плотность, т/м ³		Пустотность, %	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	Модуль крупности
	насыпная	истинная			
Песок (природный)	1,485	2,683	44,65	1,89	2,18

Таблица 8

Гранулометрический состав песка
Granulometric composition of sand

Размер зерен, мм	Масса песка на сите, г	Частный остаток, %	Полный остаток, %	Модуль крупности
10	0	0	0	
5	17,40	1,74	1,74	
2,5	39,40	3,94	5,68	
1,25	94,70	9,47	15,15	
0,63	172,70	17,27	32,42	
0,315	376,00	37,60	70,02	
0,14	248,70	24,87	94,89	
0,071	42,00	4,20	99,09	
<0,071	9,10	0,91	100,00	

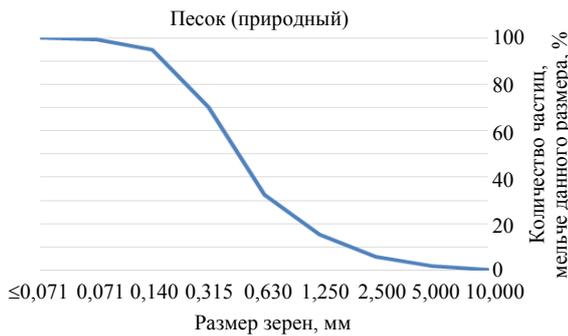


Рис. 2. Гранулометрический состав природного песка первого класса

Fig. 2. Granulometric composition of natural sand of the first class

Состав цементобетонной смеси

Состав цементобетонной смеси рассчитывали в соответствии с СТБ 1182 [13]. В связи с отсутствием в составе пластификаторов и иных добавок для придания требуемой удобоукладываемости принимали максимальное водоцементное отношение ($B/C = 0,45$) для покрытий дорог I–III категорий в соответствии с [14]. Состав цементобетонной смеси представлен на рис. 3.

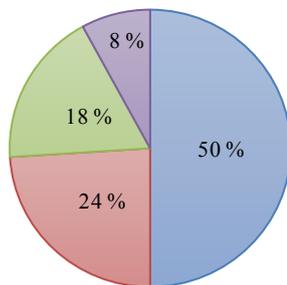


Рис. 3. Состав цементобетонной смеси:

■ – цементогранулят фракций 5–20; ■ – песок;
■ – цемент; ■ – вода

Fig. 3. Composition of cement-concrete mixture:

■ – cement granulate fractions 5–20; ■ – sand;
■ – cement; ■ – water

Удобоукладываемость цементобетонной смеси оценивали по осадке конуса, от формован-

ного в соответствии с п. 5 [15]. Результат испытаний представлен в табл. 9.

Таблица 9

Результат испытаний цементобетонной смеси на удобоукладываемость

Result of testing cement concrete mixture for workability

Наименование характеристики	Результат испытания		Среднее значение
Осадка конуса, см	3,27	3,43	3,35

В соответствии с [16] марка бетона по осадке конуса (по удобоукладываемости) П1, она наиболее предпочтительна для дорожных бетонов.

Из полученной бетонной смеси выполняли формовку стандартных образцов-кубов размерами $100 \times 100 \times 100$ мм в соответствии с ГОСТ 10180 [17]. Прочность бетона на сжатие f_c , МПа, вычисляли по формуле

$$f_c = \alpha \frac{F}{A},$$

где α – масштабный коэффициент, для формы $100 \times 100 \times 100$ мм $\alpha = 0,95$; F – разрушающая нагрузка, Н; A – площадь рабочего сечения образца, мм^2 .

Результат испытаний цементобетона приведен в табл. 10.

Гарантированную прочность бетона находили по формуле

$$f_{c.cube}^G = f_{cm} (1 - 1,64K_v),$$

где f_{cm} – предел прочности на сжатие бетона (средний), МПа; K_v – коэффициент вариации (изменчивости).

В соответствии с п. 3.5 [13] примем коэффициент вариации 13,5 %. Результаты расчетов прочности цементобетона представлены в табл. 11.

Таблица 10

Результат испытаний цементобетона

Test result for cement concrete

Проектный класс бетона по прочности, МПа	Размер формы, мм	Масштабный коэффициент	Масса образца, г	Средняя плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	Разрушающая нагрузка, кН	Прочность образца, приведенная к базовому размеру, МПа	Средняя прочность образца в серии, МПа
В35	$100 \times 100 \times 100$	0,95	2345,3		2,34		
			2353,0	474		45,03	

Результаты расчетов прочности цементобетона
Calculation results of cement concrete strength

Проектный класс бетона по прочности, МПа	Средняя прочность образца в серии f_{cm} , МПа	Требуемая прочность бетона при подборе состава $f_{c,тр}$, МПа	Гарантированная прочность бетона $f_{c,cube}^G$, МПа		Общее заключение
			полученная	требуемая	
V35	45,13	45,00	35,13	35,00	Соответствует требованиям нормативных документов

ВЫВОДЫ

1. На основании выполненных исследований установлено, что цементогранулят (продукта переработки различных поврежденных железобетонных изделий) можно рекомендовать для устройства оснований по методу заклинки, а также в качестве альтернативы щебню при приготовлении бетонных смесей для плит сборного покрытия.

2. Цементогранулят особенно может быть востребован при строительстве и реконструкции местных дорог. В настоящее время выполняется программа по повышению транспортно-эксплуатационного уровня местных дорог, а это – около 70 тыс. км. Поэтому потребуется огромное количество дорожно-строительных материалов. Применение вторичных ресурсов позволит не только снизить затраты на строительство, но и уменьшить негативное их воздействие на окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобильные дороги / Я. Н. Ковалев [и др.]. Минск: Арт Дизайн, 2006. 351 с.
2. Инновации в строительстве и эксплуатации дорожно-строительного комплекса: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых, аспирантов и студ., Минск, 22–23 нояб. 2017 г. / ред. А. В. Бусел и др. Минск: БНТУ, 2017. 90 с.
3. Веренько, В. А. Новые материалы в дорожном строительстве / В. А. Веренько. Минск: Технопринт, 2004. 169 с.
4. Реут, Ж. В. Цементогранулят как альтернатива природному сырью / Ж. В. Реут, С. И. Зиневич, Д. М. Ковалев // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / редкол. С. Е. Кравченко (гл. ред.) и др. Минск: БНТУ, 2020. С. 65–70.
5. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний: ГОСТ 8269.0–97. Введ. 01.01.1999. Минск: Минстройархитектуры, 1999. 78 с.
6. Смесей щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия: СТБ 2318–2013. Введ. 01.01.2014. Минск: Госстандарт, 2013. 18 с.
7. Автомобильные дороги. Правила устройства: ТКП 059.1–2020. Введ. 01.09.2020. Минск: Мин-во трансп. и коммуник. Респ. Беларусь, 2020. 76 с.
8. Автомобильные дороги. Цементобетонные основания и покрытия. Правила устройства: ТКП 45-3.03-88–2007. Введ. 20.12.2007. Минск: Минстройархитектуры, 2017. 44 с.
9. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия: СТБ 1544–2005. Введ. 01.07.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2005. 36 с.
10. Дороги автомобильные общего пользования. Цемент. Технические требования: ГОСТ 33174–2014. Введ. 01.07.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.
11. Песок для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8736–2014. Введ. 01.04.2017. Минск: Госстандарт, 2016. 18 с.
12. Вода для бетонов и растворов. Технические условия: СТБ 1114–98. Введ. 01.01.1999. Минск: Минстройархитектуры, 1998. 20 с.
13. Бетоны. Правила подбора состава: СТБ 1182–99. Введ. 01.07.2000. Минск: Минстройархитектуры, 2000. 16 с.
14. Бетоны конструкционные тяжелые для транспортного и гидротехнического строительства. Технические условия: СТБ 2221–2020. Введ. 01.04.2021. Минск: Госстандарт, 2020. 28 с.
15. Смесей бетонные. Методы испытания: СТБ 1545–2005. Введ. 01.07.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2005. 26 с.
16. Смесей бетонные. Технические условия: СТБ 1035–96. Введ. 01.07.1997. Минск: Минстройархитектуры, 1996. 52 с.
17. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. Введ. 01.07.2013. Минск: Минстройархитектуры, 2013. 36 с.

Поступила 30.11.2021

Подписана в печать 01.02.2022

Опубликована онлайн 31.03.2022

REFERENCES

1. Kovalev Ya. N., Leonovich I. I., Yaromko V. N., Verenko V. A., Minin A. V., Cheptsov G. V., Yatsевич I. K. (2006) *Highways*. Minsk, Art Design Publ., 351 (in Russian).
2. Busel A. V. (ed.) (2017) *Innovatsii v Stroitel'stve i Eksploataatsii Dorozhno-Stroitel'nogo Kompleksa: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Molod. Uchenykh, Aspir., Magistrantov i Stud., Minsk, 22–23 Noyab. 2017 g.* [Innovations in the Construction and Operation of the Road Construction Complex: Proceedings of International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Graduate Students, Undergraduates and Students, Minsk, Nov. 22–23, 2017]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 90 (in Russian).
3. Verenko V. A. (2004) *New Materials in Road Construction*. Minsk, Tekhnoprint Publ., 169 (in Russian).
4. Reut Zh. V., Zinevich S. I., Kovalev D. M. (2020) Cement Granulate as an Alternative to Natural Raw Materials. *Dorozhnoe Stroitel'stvo i ego Inzhenernoe Obespechenie: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Road Construction and its Engineering Support: Proceedings of International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 65–70 (in Russian).
5. State Standard 8269.0–97. *Crushed Stone and Gravel from Dense Rocks and Industrial Waste for Construction Work. Methods of Physical and Mechanical Tests*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 1999. 78 (in Russian).
6. STB [Standards of the Republic of Belarus] 2318–2013. *Crushed Stone-Gravel-Sand Mixtures for Pavements and Foundations of Roads and Airfields. Specifications*. Minsk, Gosstandart Publ., 2013. 18 (in Russian).
7. ТКР [Technical Code of Good Practice] 059.1–2020. *Highways. Rules for Construction*. Minsk, Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus, 2020. 76 (in Russian).
8. ТКР [Technical Code of Good Practice] 45-3.03-88–2007. *Highways. Cement Concrete Bases and Coatings. Rules for Construction*. Minsk: Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2017. 44 (in Russian).
9. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1544–2005. *Structural Heavy Concrete. Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2005. 36 (in Russian).
10. State Standard 33174–2014. *Public Automobile Roads. Cement. Specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 11 (in Russian).
11. State Standard 8736–2014. *Sand for Construction Work. Specifications*. Minsk, Gosstandart Publ., 2016. 18 (in Russian).
12. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1114–98. *Water for Concretes and Mortars. Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 1998. 20 (in Russian).
13. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1182–99. *Concretes. Rules for the Selection of Composition*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2000. 16 (in Russian).
14. STB [Standards of the Republic of Belarus] 2221–2020. *Structural Heavy Concretes for Transport and Hydraulic Engineering Construction. Specifications*. Minsk, Gosstandart Publ., 2020. 28 (in Russian).
15. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1545–2005. *Concrete Mixes. Test Methods*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2005. 26 (in Russian).
16. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1035–96. *Concrete Mixes. Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 1996. 52 (in Russian).
17. State Standard 10180–2012. *Concretes. Methods for Determining the Strength of Control Samples*. Minsk: Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2013. 36 (in Russian).

Received: 30.11.2021

Accepted: 01.02.2022

Published online: 31.03.2022

Behavioral Characteristics of Cement Concrete Pavements in South Kazakhstan: Climatic Changes and Optimal Construction Method

D. Sakanov¹⁾, Z. Saginov²⁾, S. Mominova³⁾, Z. Ussenkulov³⁾, Kwang-don Kim³⁾

¹⁾JSC “Kazakhstan Highway Research Institute” (Almaty, Republic of Kazakhstan),

²⁾Ministry for Investments and Development (Almaty, Republic of Kazakhstan),

³⁾Mukhtar Auezov South Kazakhstan University (Shymkent, Republic of Kazakhstan)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Abstract. The present paper describes experiments and research outcomes concerning the construction of cement concrete pavements in South Kazakhstan, taking into account significant climate changes. The study has identified potential problems in the construction of cement concrete pavements in the region, where there was no experience of their construction until the mid-2000s. In order to develop an optimal solution, the technical factors that characterize the process of arranging these coatings using sliding molds are analyzed and quantitatively normalized. These factors include the optimal amount of mortar for curing concrete, the optimal joint cutting time, the interval and effective width of expansion joints to prevent the formation of cracks in concrete at an early age. The effectiveness of the use of polyethylene film to prevent the formation of contraction cracks and maintain the required mode of hardening of the cement concrete pavement is shown. The main cause of damage to the expansion joints along the length of the day coverage of coatings in the conditions of South Kazakhstan has been established. Recommendations have been developed for the installation of cement-concrete pavement and expansion joints during the construction of roads in this region. The accumulated data on climatic factors and methods of work with the use of polyethylene film have made it possible to create an optimal method for the construction of cement concrete pavements, which will improve the quality of roads in South Kazakhstan.

Keywords: cement concrete pavement, cutting time, curing mode, polyethylene film, mock-up test, climatic factors, South Kazakhstan, joint cutting

For citation: Sakanov D., Saginov Z., Mominova S., Ussenkulov Z., Kwang-don Kim (2022) Behavioral Characteristics of Cement Concrete Pavements in South Kazakhstan: Climatic Changes and Optimal Construction Method. *Science and Technique*. 21 (2), 142–149. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-142-149>

Поведенческие характеристики цементобетонных покрытий в Южном Казахстане: климатические изменения и оптимальный метод строительства

Канд. техн. наук Д. Саканов¹⁾, З. Сагинов²⁾, С. Моминова³⁾, профессора Ж. Уссенкулов³⁾, Ким Кванг-дон Ким³⁾

¹⁾Акционерное общество «Казахстанский научно-исследовательский институт автомобильных дорог» (Алматы, Республика Казахстан),

²⁾Министерство по инвестициям и развитию Республики Казахстан (Алматы, Республика Казахстан),

³⁾Южно-Казахстанский университет имени Мухтара Ауэзова (Шымкент, Республика Казахстан)

Реферат. В статье изложены результаты исследований цементобетонных дорожных покрытий в Южном Казахстане, для которого характерны значительные изменения климата. Выявлены потенциальные проблемы устройства

Адрес для переписки

Ким Кванг-дон Ким
Южно-Казахстанский университет имени Мухтара Ауэзова
просп. Тауке хана, 5,
160012, г. Шымкент, Республика Казахстан
Тел.: +7 701 707-12-21
kikwkd@gmail.com

Address for correspondence

Kwang-don Kim
Mukhtar Auezov South Kazakhstan University
5, Tauke khan Ave.,
160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan
Тел.: +7 701 707-12-21
kikwkd@gmail.com

цементобетонных дорожных покрытий в регионе, где не было опыта их строительства вплоть до середины 2000 гг. С целью выработки оптимального решения проанализированы и количественно нормированы технические факторы, характеризующие процесс устройства данных покрытий с использованием скользящих форм. К таким факторам отнесены оптимальное количество раствора для отверждения бетона, оптимальное время нарезки шва, интервал и эффективная ширина деформационных швов для предотвращения образования трещин в бетоне в раннем возрасте. Показана эффективность применения полиэтиленовой пленки для предупреждения образования усадочных трещин и поддержания требуемого режима твердения цементобетонного покрытия. Установлена основная причина повреждения швов расширения на длине дневной захватки и разработаны рекомендации по устройству цементобетонных покрытий и швов расширения при строительстве автомобильных дорог в регионе. Накопленные данные о климатических факторах и методах производства работ с использованием полиэтиленовой пленки позволят оптимизировать строительство цементобетонных дорожных покрытий в Южном Казахстане.

Ключевые слова: цементобетонное покрытие, время резки, режим твердения, полиэтиленовая пленка, пробный макет, климатические факторы, Южный Казахстан, совместная резка

Для цитирования: Поведенческие характеристики цементобетонных покрытий в Южном Казахстане: климатические изменения и оптимальный метод строительства / Д. Саганов [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 142–149. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-142-149>

Introduction

In general, construction techniques are developed through trial and error for cement concrete pavement construction in areas without a history of road construction. According to a preliminary survey, research on the development of construction techniques for South Kazakhstan reflecting the region's climatic and material characteristics is still in an early stage. Conversely, a rich body of research outcomes exists for countries with a large coverage of concrete pavement including the US and South Korea, which started many decades ago. Recent studies present models for curing durability and performance assessment [1–3], as well as for joint behavior, cracks, and temperature stress [4–6]. As such, the present paper aims to analyze and re-assess a number of experiment and construction data and other related data accumulated from the cement concrete pavement construction project, which has been ongoing since 2011 at the study site, which is characterized by climatic changes.

Study objective and method

Many existing studies demonstrated that construction methods and early-stage quality management significantly affect the endurance and lifespan of cement concrete pavement [1, 7, 8]. Considering climate variables, various experiments were conducted to determine concrete pavement construction methods to overcome changing climatic conditions. These included investigating road length for daily pavement work, effective curing and temperature control methods to prevent initial cracks, optimal

spraying amount and method to maximize the effect of the curing-membrane, determining the most suitable installation interval and effective width of expansion joints, and optimal joint cutting period and depth. In particular, the target site experienced a number of days with strong winds, and it was judged that surface defects are highly likely because of rapid water evaporation from the concrete pavement surface during the construction process [9]. Therefore, polyethylene film (PE-film) was used as a measure to prevent this problem. Thus, this study also investigated the effect of the initial curing method, in which entire concrete slabs were covered.

Characteristics of the climate of South Kazakhstan

The target site for this study is situated in South Kazakhstan, 100 km from Shymkent in the direction of Turkestan. The Western Europe – Western China Road Project is currently in progress, and the region is marked by a highly varying diurnal temperature range, which is relatively large compared to other areas of the country. Fig. 1 shows the measured temperature pattern during the summer from August to September.

The temperature at the study site during the summer season was measured for analysis. Tab. 1 provides the maximum temperature range. The maximum temperature recorded was 48 °C when direct sunlight directly affected the area. The temperature dropped to between (–15) and (–25) °C in the winter. The highest temperature was recorded at around 3 to 4 pm, and the minimum at 5 to 6 am.

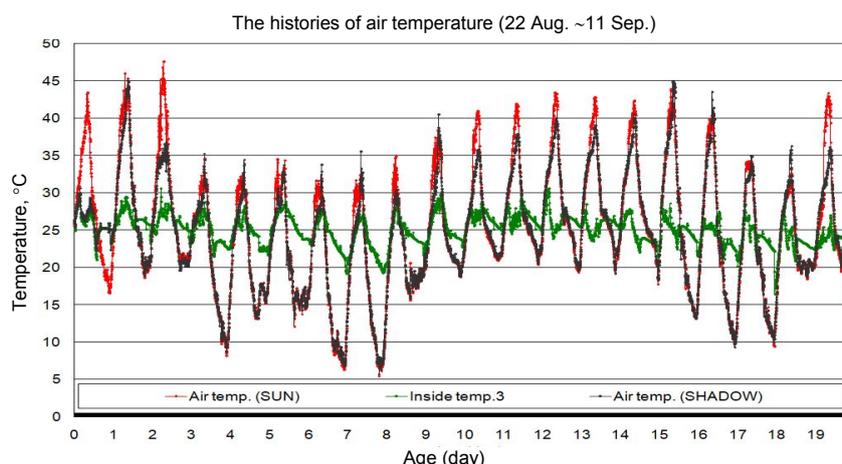


Fig. 1. Measured temperature (August to September in South Kazakhstan)

Table 1
Characteristics of summer season climatic changes in South Kazakhstan

Category	Range of indicators	Range of concrete temperature change
Highest temperature, °C	40–44	43–48
Lowest temperature, °C	15–25	20–30
Diurnal temperature range, °C	19–25	18–23
Humidity, %	15–65	–
Wind speed, m/s	4–10	–

The humidity of the study site ranged between 15 and 65 %. This relatively low humidity range is explained by the low probability and amount of rainfall during the summer. Although the rainfall probability increases from late September to May the next year, the rainfall amount is only as high as a few dozen mm. Wind speed was measured using a wind speed meter, ranging from 1–2 m/s, 4–5 m/s, and reaching a maximum of more than 10–20 m/s on days with strong winds.

Concrete mock-up test

- Production of experimental concrete slab and test results

The concrete mix design used for the mock-up test is shown in Tab. 2. Materials meeting the standards and regulations were used for the cement, aggregates, water, and admixture.

The amount of concrete curing compound, curing method, and changes in slab surface and concrete strength development according to the climate were analyzed, as shown in Fig. 2. The change in concrete strength in the slab surface induced by the changing climate was analyzed, and the optimum joint cutting period was determined. The results are provided in Tab. 3.

The surface was finished upon pouring the concrete. Then, 0.50 and 0.75 l/m² of the concrete curing compound tested in experiment were sprayed on two test slabs, and the curing process was observed as shown in Fig. 3, 4.

Table 2
Mix design of concrete, kg/m³

Slump, cm	Water	Cement	Sand	Gravel (5–20 mm)	Gravel (20–40 mm)	Admixture
0–4	147	405	696	598	489	3.0



Fig. 2. Process of experiment (spraying the concrete curing compound and cutting joints)

Table 3

Experiment results of concrete curing compound and cutting joints

Concrete temperature	28 °C	Slump	4 cm	Air content	4,5 %	Humidity	20–40 %
State of changing air temperature during the experiment (condition)	(Condition 1) 20 °C → when the temperature rises (Condition 2) 50 °C → when the temperature drops			Range of curing temperature		20–50 °C	
Results of curing experiment (occurrence of cracks)	(Condition 1) concrete curing compound sprayed (0.5 l/m ²) and not sprayed			Period of small cracks observed on the slab surface Concrete curing compound not applied: 1 h Concrete curing compound applied: 2 h			
	(Condition 2) concrete curing compound sprayed (0.5 l/m ²)			No cracks occurred			
Results of joint cutting experiment	(Condition 1) concrete curing compound sprayed (0.5 l/m ²) and not sprayed			No damage was observed on joints from after 6 h The air temperature rose to 50 °C The hydration reaction of concrete became faster			
	(Condition 2) concrete curing compound sprayed (0.5 l/m ²)			No damage was observed on joints from after 8 h The air temperature dropped to 20 °C The hydration reaction of concrete was delayed			



Fig. 3. Process of concrete slab mock-up test

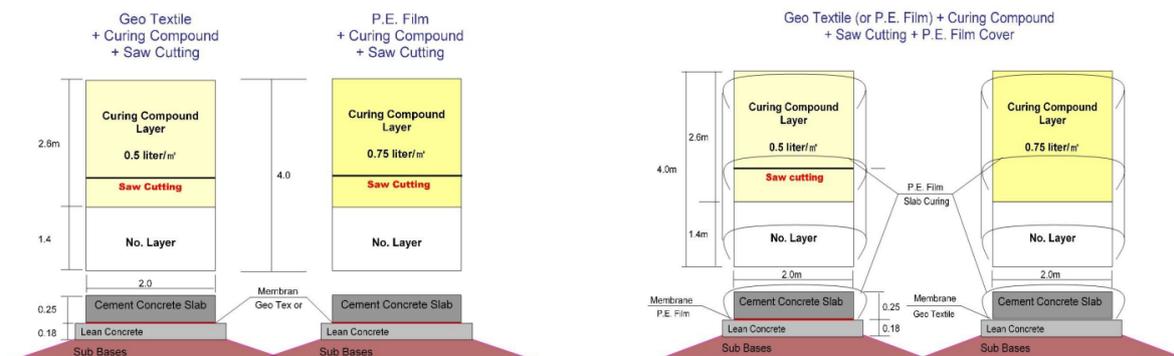


Fig. 4. Curing and joint cutting in concrete slab mock-up test

The two test slabs were cured under the same climatic conditions as at the study site without additional curing intervention. The surfaces of the other two concrete slabs were covered with PE-film, and the curing process and strength development according to the temperature were measured in real time. The temperature of the test slabs was measured at the top surface, the central core, and at bottom surface every 10 min. The results of the mock-up test are provided below.

1. Two to three hairline cracks were observed in the test slab sprayed with a concrete curing compound without a PE-film during the initial curing process. On the other hand, no defects were

observed on the surface of the slab covered with the PE-film.

2. The internal temperature change of the concrete slabs was analyzed. As shown in Fig. 5, the maximum temperature of the core area of the air-cured slab was approximately 35 °C, and the air temperature determined the surface temperature. On the other hand, the internal temperature of the test slab cured using PE-film increased to 45 °C. The surface temperature increased along with the changing internal temperature. Therefore, the curing method using PE-film is highly effective as a temperature and strength control method to handle the climatic changes of the region.

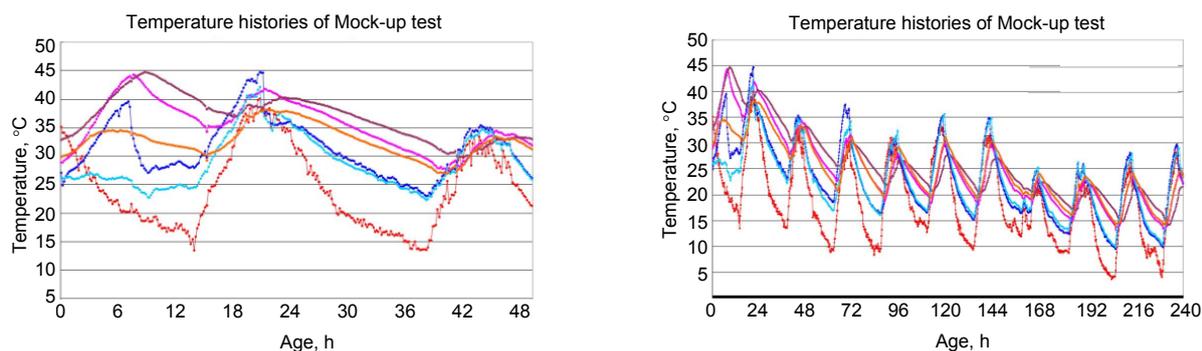


Fig. 5. Temperature pattern of the concrete slabs (2nd and 10th days):
 — Air temperature; — Top surface (#3); — Core (#3); — Bottom (#3);
 — Top surface (#2); — Core (#2);

3. All slab temperature changes maintained a slight temperature difference after 16 to 20 h after pouring the concrete. At this point, the slab temperature increased if the air temperature was high, and decreased when the air temperature was low.

4. In regions with a relatively large diurnal temperature range caused by the changing temperature, the contraction and expansion rate of slabs increases. Cracks are highly likely in areas affected by the base confinement caused by friction, as the difference in stress also increases [8, 10].

5. To prevent initial cracks in concrete slabs, it is critical to determine an optimal cutting period to reduce the section of contracted joints before random cracks occur. These are caused by stress imposed on the concrete during the initial hardening period [11].

• Results of the curing test

A test was conducted using the existing curing method of spraying concrete curing compound commonly used for cement concrete pavement and the new alternative method of PE-film application [8, 12, 13]. The general operation speed of the curing compound spraying equipment is approximately 20 m/min for concrete pavement work, and 0.5 l/m² of material is sprayed. The equipment

was operated at varying speeds. It was found that operating the equipment at 10 m/min, which is half the general operation speed, produced a positive result for forming curing membrane on the slab surface. Noteworthy is that a spraying operation at an extremely slow speed causes curing material flow across the slab surface.

The curing performance of PE-film was highly effective in preventing various defects caused by dramatic drying and temperature changes, as shown in Fig. 6. This new curing method induces the early development of concrete strength and shortens the time required for contraction joint cutting.

• Early behavior assessment of concrete pavement joints and cutting test

According to the field survey and experiment, joints were identified as areas of unreinforced cement concrete pavement where defects most frequently occur. The most important factor in joint work is the time point of covered slab cutting, as shown in Fig. 7. When joints are cut too late, cracks are not induced in the intended way, but irregularly occur in unwanted areas. In contrast, as shown in Fig. 8, cutting the joints too early may cause defects and damage the joints [14–16].



Fig. 6. Process of the curing test using polyethylene film

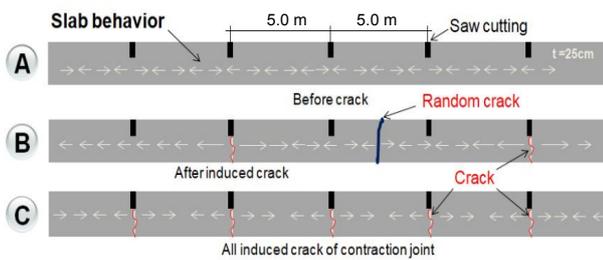


Fig. 7. Behavior of concrete slab with joints

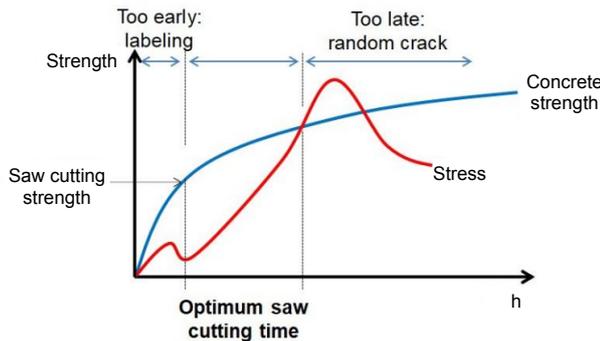


Fig. 8. Stress change in slab and joint cutting period

Crack induction test in horizontal contraction joint. Concrete slab behavior after completing the placement work is closely associated with the occurrence of initial cracks. The major causes are environmental load including temperature and humidity, not traffic load [10, 17]. Cracks started to occur on the slabs 15 to 24 h after completing the concrete pouring. The survey and experiment demonstrated that slab volume decreases as its temperature drops when the air temperature falls. This causes friction on the lower part of the structure, which produces cracks [8, 17].

The results of the assessment of cracks induced in the contraction joints are provided in Tab. 4. In total, 27–85 % of the total joints were normally induced as intended between the second and seventh day of curing. More joints were induced when the road length for daily pavement work was longer than when shorter, and more cracks occurred on the inside than on the outside. Fig. 9 shows the joint cut appearing in the concrete slabs and

form of induced cracks. The survey of induced cracks indicated that the crack gap ranged about 0.3 to 0.5 mm around the two ends of the slabs, and a maximum of 2.5 mm in the center. These gaps are closely associated with the friction caused by the degree of slab contraction and base confinement. This indicates that the climatic conditions on the day of the pavement pouring and temperature change in the paved slab are associated with the process of crack induction in contraction joints.

Table 4

Overview of crack induction in contraction joints

Road length per day, m	Number of installed contraction joints, number of places	Measurement date, day	Number of induced cracks, number of places	Rate, %
335	67	2	26	38.8
55	11	3	3	27.3
205	41	5	30	73.2
90	18	7	15	83.3



Fig. 9. Form of crack in contraction joints of concrete pavement

Tab. 5 shows the optimal joint cutting time for concrete slabs, which is closely associated with temperature, wind, diurnal temperature range, and concrete pouring time. Considering climatic changes in the South Kazakhstan region, 4 am to 3 pm is the most appropriate time for pouring concrete when the temperature ranges between 20 and 40 °C for slab temperature and strength management. It is easy to induce contraction joint cracks if joint cutting is completed late the same night.

Table 5

Optimal joint cutting time for concrete pouring (temperature range 20–40 °C)

Category	Optimal joint cutting time according to concrete pouring time				
	4:00–9:00	9:00–11:00	11:00–15:00	15:00–21:00	21:00–01:00
Concrete pavement time	4:00–9:00	9:00–11:00	11:00–15:00	15:00–21:00	21:00–01:00
Optimal time for joint cutting, h	6	5	4	8	10

Horizontal expansion joints and construction joints. The expansion and contraction of concrete slabs are caused by various factors including types of coarse aggregates; concrete contraction coefficient [18, 19]; texture of separation membrane; climatic changes such as temperature, humidity, and wind; diurnal temperature range; concrete pouring temperature; curing method; and cutting period. In this study, the actual slab behavior and deformation were measured. The measurement results were analyzed to establish a maximum construction length per day and detailed construction plan to design a new technique that prevents slab cracks. Fig. 10 shows the behavior of horizontal expansion joints and the process to measure expansion.



Fig. 10. Measurement of the behavior and length of expansion of horizontally expanded joints

Fig. 11 shows the forms of damage to the expansion and contraction joints caused by the slab



Fig. 11. Contraction joints and expansion joints damaged by slab behavior

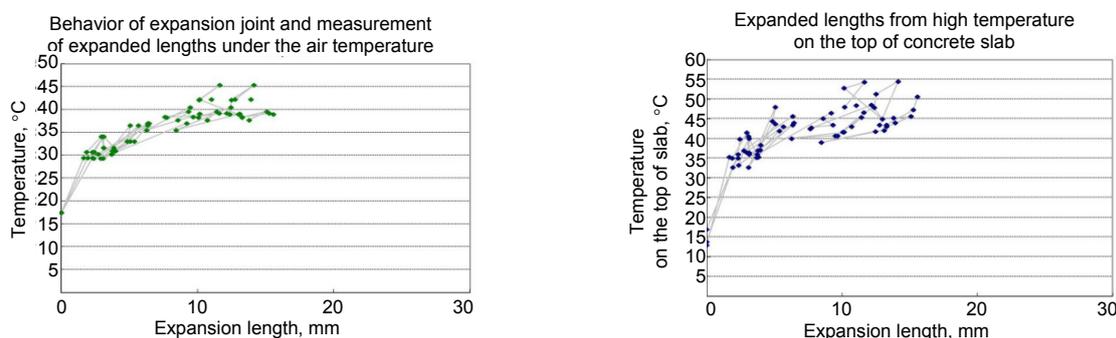


Fig. 12. Measurement of changes in horizontally expanded joints caused by slab behaviors

behavior when the concrete expands. Fig. 12 shows the behavior of horizontal expansion joints and the measured expansion in a graph.

According to the experiment and measurements, the requirements for setting the interval of expansion joints installed in the daily paving length are as follows:

- 1) the expansion joint should be installed at the end of daily work. The installation should be performed with great precision;
- 2) the total expansion of a slab reduces if cracks are caused in many contraction joints within 24 h after completion of the concrete pavement;
- 3) the concrete slab during early curing should be stronger than the internal stress;
- 4) the cumulative expansion of a slab exposed to a high temperature has a greater effect than contraction, and this is the major cause of damage to expansion joints;
- 5) therefore, the daily paving length for a cement concrete pavement and width of expansion joints can be controlled, as shown in Tab. 6. This causes noise for running vehicles and damage to the joints when the width of the expansion joints is greater than 30 mm. Thus, the width should be less than 30 mm.

Table 6

Number of joints to be installed and effective width according to the length of concrete paving per day

Length of concrete paving per day, m	200	300	400	500	600
Width (mm) × number of joints for installation	20×1	30×1	20×2	25×2	30×2

CONCLUSIONS

1. Various defects in cement concrete pavement are determined by the climatic environment and conditions of the target construction site (including temperature, humidity and wind speed). However, it was difficult to identify the real causes, as the areas with defects were not assessed and no data were collected from the damaged areas.

2. It is necessary to establish a construction technique that considers climatic changes variables for cement concrete-paved road construction in this area. It is recommended to survey and analyze the initial behaviors of concrete pavement produced reflecting the material properties and environmental conditions to enhance the quality of the product.

3. It was necessary to first perform a mock-up test and field construction test, and then to investigate the thermal and mechanical properties of concrete slabs in the same climatic conditions as those at the real study site. This study surveyed the behavioral characteristics of the test slabs to prevent damage to the joints, which are the vulnerable part of a cement concrete pavement. The study suggests the location and width of expansion joints reflecting the optimal joint cutting period and suitable road length for daily pavement work in the given climatic conditions.

4. Finally, standards for the optimal amount of concrete curing compound and optimal operation speed of spraying equipment were suggested to help prevent cracks caused by drying and contraction, which may occur on the paved road surface during the summer season. In addition, the application of polyethylene film was suggested for the effective curing control of concrete slabs. It was confirmed that this method prevents cracks caused by dry surfaces and contraction, and provides the effect of humid curing to the surface.

REFERENCES

1. Christopher J., Ryu S. W., Park J. Y., Cho Y. H., Kim I. T. (2017) The Analyses of Environmental Factors for Curing Concrete Pavements Inside Tunnel. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (3), 766–773. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0524-3>.
2. Oh H. S., Lee H. G., Sim J. S. (2017) Experimental Comparison of Methods to Assess the Durability of Concrete Pavement Deteriorated from Scaling and Freeze–Thaw Effect. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22 (7), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1738-8>.
3. Rahman M. M., Uddin M. M., Gassman S. L. (2017) Pavement Performance Evaluation Models for South Carolina. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (7), 2695–2706. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0544-7>.
4. Lee S. W. (2013) A Probabilistic Model for Joint-Movements in Jointed Concrete Pavement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 7 (2), 141–146. <https://doi.org/10.1007/bf02841972>.
5. Seo Y. G., Kim S. M. (2013) Longitudinal Cracking at Transverse Joints Caused by Dowel Bars in Jointed Concrete Pavements. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17 (2), 395–402. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-2047-5>.
6. Qin Y. H., Hiller J. E. (2011) Modeling the Temperature and Stress Distributions in Rigid Pavements: Impact of Solar Radiation Absorption and Heat History Development. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15 (8), 1361–1371. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-1322-6>.
7. Kolyvas C. (2007) *Curing of Concrete*. MSc Thesis, Delft University of Technology.
8. Ministry of Construction and Transportation (2004) *Guidelines for the Development of Korean-Style Pavement Design Method and Improvement of Pavement Performance*. Republic of KOREA.
9. Gebler S. H., Jones C. L. (2001) *Guide to Curing Concrete*. American Concrete Institute.
10. Suh Y. C. (1991) *Early-Age Behavior of CRC Pavement and Calibration of Failure Prediction Model of CRCP-7*. PhD Dissertation, the University of Texas at Austin.
11. Okamoto P. A. (1994) *Guidelines for Timing Contraction Joint Sawing and Earliest Loading for Concrete Pavements. Final Report, FHWA-RD-91-079*. FHWA, Washington D. C.
12. Tiznobaik M., Bassuoni M. T. (2017) Application of Curing Compounds on Concrete Pavement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44 (6), 452–461. <https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0499>.
13. Larson R. M., Vaniker S., Forster S. (1993) *U.S. Tour of European Concrete Highways: Follow-Up Tour of Germany and Austria, Report FHWA-SA-93-080*. FHWA, U.S. Department of Transportation.
14. Chon B. J., Lee S. W. (2007) Effects of Uncracked Joints in Jointed Concrete Pavements. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 11 (3), 141–144. <https://doi.org/10.1007/bf02823893>.
15. McCullough B. F., Rasmussen R. O. (1999) *Fast-Track Paving Concrete Temperature Control and Traffic Opening Criteria for Bonded Overlays. Vol. II: HIPERPAV User's Manual, FHWA-RD-98-168*. U.S. Department of Transportation, FHWA.
16. Bruce A. S. (1995) *Saw Cutting Joints in Concrete*, Concrete Construction USA.
17. Sun R. J., Nam Y. K., Hong S. H., Jeong J. H. (2008) Effect of Temperature and Moisture on Curing of Early Age Concrete Slabs. *Korea Society of Road Engineers Publication*, (10–1), 105–115 (in Korean).
18. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009) *Guidelines for the Production and Construction of Cement Concrete Pavement*. Republic of Korea.
19. FHWA Pavement Notebook (1989) *Benefits of Using Dowel Bars*. Technical Paper 89–03, Federal Highway Administration. Washington D. C.

Received: 18.01.2021

Accepted: 06.04.2021

Published online: 31.03.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157>

УДК 656

Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке

Докт. техн. наук Д. В. Капский¹⁾, В. Н. Кузьменко¹⁾,
А. С. Красильникова¹⁾, С. С. Семченков¹⁾,
канд. техн. наук, доц. Е. Н. Кот¹⁾, докт. техн. наук, проф. О. Н. Ларин²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Рассмотрены варианты уменьшения экологических потерь в Полоцке и Новополоцке за счет развития систем троллейбусного и трамвайного движения – различных видов городского электрического транспорта. С целью сокращения затрат на создание транспортной (в том числе и зарядной) инфраструктуры, а также на эксплуатационные издержки определена эффективность таких систем при использовании не только классических видов транспорта, но и гибридных автобусов, электробусов, дуобусов. Разработаны подходы и способы повышения качества обслуживания пассажиров без ухудшения экологической обстановки – это станет возможным благодаря развитию трамвайного и троллейбусного движения в Полоцке и Новополоцке. Приведены варианты сценариев использования различных видов городского электрического транспорта в исследуемых городах, которые снизят капиталовложения в транспортные средства и расходы на создание эксплуатационной базы за счет имеющихся производственных мощностей, например трамвайного парка. Кроме того, это позволит создать и организовать уникальную агломерационную рельсовую пассажирскую систему, которая может стать одним из способов развития туристического потенциала Полоцка и Новополоцка. Предложения, изложенные в статье, направлены на улучшение экологической ситуации в этих городах за счет уменьшения объема выбросов вредных веществ автобусами, особенно на центральных улицах.

Ключевые слова: экологические потери, трамвай, троллейбус, электробус, гибридный автобус, дуобус, городской электрический транспорт

Для цитирования: Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке / Д. В. Капский [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157>

Analysis of Development of Various Types of Urban Electric Transport in Polotsk and Novopolotsk

D. V. Kapskiy¹⁾, V. N. Kuzmenko¹⁾, A. S. Krasilnikava¹⁾,
S. S. Semchenkov¹⁾, E. N. Kot¹⁾, O. N. Larin²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The paper considers options for reducing environmental losses in Polotsk and Novopolotsk through the development of trolleybus and tram systems – various types of urban electric transport. In order to reduce the costs of creating

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-05-48
oapdd_atf@bntu.by

Address for correspondence

Kapskiy Denis V.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-05-48
oapdd_atf@bntu.by

transport (including charging) infrastructure, as well as operating costs, the effectiveness of such systems has been determined when using not only classic types of transport, but also hybrid buses, electric buses, duo-buses. Approaches and methods have been developed to improve the quality of passenger service without deteriorating the environmental situation – this will become possible thanks to the development of tram and trolleybus traffic in Polotsk and Novopolotsk. Variants of scenarios for the use of various types of urban eclectic transport in the cities under study are presented, which will reduce investment in vehicles and the cost of creating an operational base at the expense of existing production facilities, for example, a tram fleet. In addition, this will make it possible to create and organize a unique agglomeration rail passenger system, which can become one of the ways to develop the tourist potential of Polotsk and Novopolotsk. The proposals outlined in the paper are aimed at improving the environmental situation in these cities by reducing the volume of emissions of harmful substances by buses, especially on the central streets.

Keywords: environmental losses, tram, trolley bus, electric bus, hybrid bus, duobus, urban electric transport

For citation: Kapskiy D. V., Kuzmenko V. N., Krasilnikava A. S., Semchenkov S. S., Kot E. N., Larin O. N. (2022) Analysis of Development of Various Types of Urban Electric Transport in Polotsk and Novopolotsk. *Science and Technique*. 21 (2), 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157> (in Russian)

Введение

Сегодня продолжается поиск вариантов повышения экологической безопасности дорожного движения [1–4]. Многие страны, в том числе Беларусь, стремятся изменить баланс производства и потребления энергии в пользу электрической. США, Япония, Корея, Германия, Англия, Франция, Китай и другие государства включили освоение гибридных и электрических технологий на транспорте в число национальных приоритетов и оказывают этому направлению серьезную господдержку [3–6].

В ближайшие десятилетия будут развиваться источники альтернативной энергии, расти требования к экологии, в том числе за счет применения различных видов городского электрического транспорта [4, 6–12], обзор основных характеристик которых приведен в табл. 1.

В настоящее время в Республике Беларусь налажено собственное производство трамваев, троллейбусов, троллейбусов-электробусов и электробусов, которые в статье рассмотрены как возможные перспективные виды городского электрического транспорта для Полоцка и Новополоцка.

Таблица 1

Основные характеристики различных видов городского электрического транспорта

Main characteristics of various types of urban electric transport

Показатель	Трамвай	Троллейбус	Троллейбус-электробус	Гибридный автобус	Электробус
Скорость	+	–	–	–	–
Обособленность от автомобильного потока	+	–	–	–	–
Доступность, сокращение и оптимизация пересадок	+	+	+	+	+
Комфорт для пассажиров	+	+	+	+/-	+
Безопасность	+	+/-	+/-	+/-	+/-
Выполнение расписания	+	+/-	+/-	+/-	+/-
Экономичность	+	–	–	–	–
Экологическая чистота	+	+/-	+/-	+/-	+/-
Привлекательность для пассажиров	+	–	+/-	–	+/-
	(«Трамвай – символ города»)		(Необычное решение)		(Необычное решение)

Обозначения: «+» – характерный признак; «–» – нехарактерный признак; «+/-» – характеризуется частично.

Оценка возможности использования троллейбусов и электробусов в Полоцке и Новополоцке

Оценка возможности использования различных видов городского электрического транспорта для Полоцка выполнена на примере автобусного маршрута № 4 «Мариненко – Боровуха-3». Трасса этого маршрута проходит по улицам Мариненко, П. Бровки, Юбилейной, Октябрьской, Гоголя, Коммунистической, Е. Полоцкой, Космонавтов и Вологина. Протяженность маршрута составляет 25,19 км, время движения автобуса в прямом и обратном направлениях по 40 мин. Действующим расписанием предусмотрено выполнение 124 рейсов, в том числе 62 рейсов в прямом и 62 – в обратном направлениях. Маршрут работает с 5:00 до 0:45. Наибольшая частота движения на маршруте, когда для обслуживания пассажиров одновременно используется девять транспортных средств, с 6:00 до 8:00 и с 16:00 до 18:00. В укрупненных расчетах принимаем, что депо для электротранспорта будет расположено в существующем автобусном парке № 2 на ул. Строительной.

Оценку возможности использования различных видов городского электрического транспорта для Новополоцка выполняли на примере автобусного маршрута № 4 «Подкастельцы – Больничный городок». Трасса маршрута проходит по улицам Молодежной, Ктаторова, Слободской, Гайдара в прямом и улицам Гайдара и Молодежной в обратном направлениях. Протяженность маршрута составляет 14,92 км, время движения автобуса в прямом направлении 25 мин, в обратном 24 мин. Действующим расписанием предусмотрено выполнение 106 рейсов (по 53 рейса в прямом и обратном направлениях). Маршрут работает с 8:24 до 23:52.

Наибольшая частота движения на маршруте, когда для обслуживания пассажиров используется одновременно пять транспортных средств, с 17:00 до 19:00. В укрупненных расчетах принимаем, что депо для электротранспорта будет расположено на ДС «Подкастельцы».

Суммарные капиталовложения (укрупненно) в инфраструктуру и транспортные средства (электробусы ОС, троллейбусы IMF и ИМС) для условного маршрута протяженностью 25 км приведены на рис. 1. При расчете капиталовложений учитывали стоимости контактной сети (КС), тяговых подстанций, зарядных станций и непосредственно транспортных средств. Затраты на стоимость проектирования и подрядных работ, на оборудование остановочных пунктов и создание базы для обслуживания и ремонта транспортных средств на предприятиях транспорта в расчетах не учитывали.

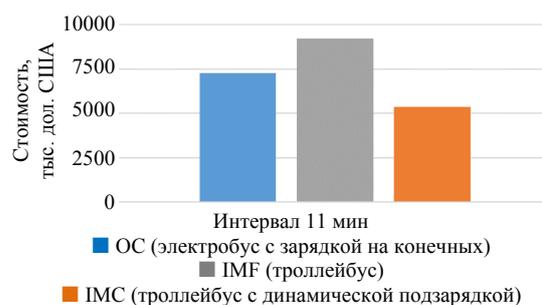


Рис. 1. Капиталовложения в инфраструктуру и транспортные средства на условном маршруте протяженностью 25 км с интервалом 11 мин

Fig. 1. Investment in infrastructure and vehicles on a conditional route length of 25 km with an interval of 11 min

Основные параметры маршрута № 4 в Новополоцке при использовании различных видов городского электрического транспорта приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры маршрута № 4 в Новополоцке при использовании различных видов городского электрического транспорта
Parameters of route No 4 in Novopolotsk when using various types of urban electric transport

Вид транспорта	Количество транспортных средств		Минимальное время оборотного рейса, мин	Средняя эксплуатационная скорость, км/ч	Протяженность участка, км	
	на маршруте	всего			с КС	без КС
Троллейбус IMF	5	7	54	16,58	14,92	0
Троллейбус ИМС	5	7	54	16,58	2,53*	12,39
Электробус ОС	7	9	67	13,36	0	14,92

* Строительство КС на участке ДС «Подкастельцы» – ОП «Василевцы».

Перспективы использования трамваев в Новополоцке и Полоцке

Трамвай – старейший вид транспорта, появившийся в начале XIX в. В мировой практике известны примеры его использования для городских, пригородных, междугородних и международных перевозок. Чтобы оставаться привлекательным для пассажиров как вид транспорта, трамвай должен быть безопасен, удобен и комфортен, а также иметь высокую скорость сообщения.

Предлагаемый базовый сценарий развития трамвайной сети в Новополоцке и Полоцке включает две крупные стадии с выделением в каждой нескольких этапов [12].

1. Развитие трамвайной сети в Новополоцке (обслуживание всех новых участков трамваями, имеющимися в трамвайном парке города).

Этап 1.1. Продление трамвайной линии от конечной станции «Измеритель» до микрорайона № 8 (6 км пути в однопутном измерении).

Этап 1.2. Продление трамвайной линии от остановочного пункта «Автобаза» до ОАО «Нафтан» (5 км пути в однопутном измерении).

Этап 1.3. Продление трамвайной линии от остановочного пункта «Техникум» по ул. Слободской до Больничного городка (конечная станция «Больница», 3 км пути в однопутном измерении).

Для реализации всех этапов данной стадии не требуется приобретение дополнительных транспортных средств, поскольку существующий в Новополоцке инвентарный парк позволяет увеличить количество трамваев, выпускаемых на линию, с 8 до 14 единиц на этапе 1.1, с 14 до 20 – на этапе 1.2, с 20 до 23 единиц – на этапе 1.3. На каждом из этапов имеющиеся в парке трамваи будут задействованы в различных комбинациях маршрутов, связывающих микрорайон № 8 с ОАО «Нафтан», заводом «Полимир» и районом больницы.

2. Агломерация – расширение сети в Полоцке.

Этап 2.1. Продление трамвайной линии от микрорайона № 8 в Новополоцке через малоэтажную застройку д. Экимань до Вильнюсского шоссе в Полоцке со строительством ко-

нечной станции у ТЦ «Манеж» (с тупиком для оборота трамваев), приобретение двусторонних трамваев для обслуживания нового агломерационного маршрута.

Этап 2.2. Продление трамвайной линии по территории Полоцка от Вильнюсского шоссе по улице М. Богдановича через реку Западную Двину до восточной части жилого района Аэродром со строительством конечной станции (с тупиком для оборота трамваев).

Этап 2.3*. В случае принятия положительного решения о строительстве нового моста через Западную Двину в районе ДС «Подкастельцы» становится возможным продление трамвайной линии до восточной части микрорайона Аэродром Полоцка через новый мост со строительством конечной станции с тупиком для оборота трамваев у пересечения с улицей М. Богдановича в Полоцке.

Этап 2.4. Продление трамвайной линии по территории Полоцка от ТЦ «Манеж» по улицам П. Бровки, Юбилейной (через реку Западную Двину), проспекту Скорины, улице Гоголя до железнодорожного вокзала Полоцка со строительством конечной станции (с тупиком для оборота трамваев).

Альтернативный сценарий предусматривает обустройство на конечных станциях «Микрорайон № 8», «Нафтан» и «Больница» (этапы 1.1, 1.2, 1.3 базового сценария развития трамвайной сети) оборотных тупиков без организации разворотных колец. Для работы такой линии необходимы приобретение и организация обслуживания двусторонних трамваев.

Характеристики выпускаемых в Республике Беларусь трамваев, которые могут рассматриваться для использования при реализации этапов 2.1–2.4, приведены в табл. 3. Для сравнения в табл. 4 представлены затраты энергии по различным показателям трамваями 2хАКСМ-802 и АКСМ-84300М в летнее и зимнее время.

* Этап 2.3 не может рассматриваться как замена этапа 2.1 в организации связи между Новополоцком и Полоцком, так как реализация этапа 2.3 без реализации 2.1 исключит из зоны обслуживания трамваями в сообщении «Новополоцк – Полоцк» городскую больницу Полоцка, пересадочный узел в районе ТЦ «Манеж» в Полоцке и, по предварительной оценке, приведет к значительному снижению пассажиропотока для трамвая.

Характеристики трамваев, выпускаемых в Республике Беларусь

Characteristics of trams produced in the Republic of Belarus

Тип транспортного средства	Одиночный трамвай	Сочлененный трамвай		
		АКСМ-84300М	АКСМ-845	Stadler-B85300М
Модель транспортного средства	АКСМ-802	АКСМ-84300М	АКСМ-845	Stadler-B85300М
Возможность двустороннего движения (организация оборота трамваев на конечных станциях без строительства разворотных колец)	+	+	+	+
Пассажировместимость, чел.	114	176	176	181
Срок службы, лет	15 (20)*			
Стоимость транспортного средства, дол.	430000	1647000	850000	1200000–1870000
Производитель	«Белкоммунмаш», Беларусь			«Штадлер», Беларусь

* Возможность продления срока службы до 20 лет предусмотрена ТКП 314–2011 [13] после выполнения капитального ремонта транспортного средства.

Примечание. Трамваи АКСМ-84300М, АКСМ-845, Stadler-B85300М оборудованы двумя кабинами управления, пассажирский салон предусматривает двери для входа и выхода пассажиров по обоим бортам трамвая. Трамвай АКСМ-802 оборудован одной кабиной управления, пассажирский салон предусматривает двери для входа и выхода пассажиров по обоим бортам трамвая. Это позволяет при формировании из АКСМ-802 двухвагонных поездов вместимостью 228 пассажиров, работающих по системе многих единиц, использовать их для двустороннего движения без строительства разворотных колец.

Таблица 4

Затраты энергии трамваями в летнее и зимнее время

Energy consumption of trams in summer and winter

Показатель	Летнее время		Зимнее время	
	2хАКСМ-802	АКСМ-60102	2хАКСМ-802	АКСМ-60102
Расход энергии на тягу, кВт·ч/км	2,40	1,30	2,40	1,30
Дополнительный расход энергии на отопление в зимнее время, кВт·ч/км	–	–	1,28	0,64
Затраты на тягу и отопление, дол./км	0,24*	0,13	0,36	0,19
Приведенные затраты энергии на тягу и отопление, дол./км на 100 пас.	0,10	0,11	0,15	0,16
Затраты энергии на тягу и отопление vs затраты на тягу, %	–	–	+50	+45

* Для предприятий электротранспорта 0,10 дол./(кВт·ч) электрической энергии.

В качестве рельсового пути для реализации базового или альтернативного сценария предлагается рассматривать два варианта:

– рельсовый путь на сборном железобетонном основании (бесшпальном) с использованием блочного рельса LK1;

– классический рельсовый путь на железобетонных шпалах с использованием рельса Р65.

Углубленный анализ основных показателей при развитии базы электрического транспорта в Новополоцке и в агломерации Полоцк – Новополоцк приведен в табл. 5.

Таблица 5

Основные показатели при развитии базы электрического транспорта в Новополоцке и агломерации Полоцк – Новополоцк

Key indicators in the development of the base of electric transport in Novopolotsk and the agglomeration Polotsk – Novopolotsk

Показатель	Вид транспорта		
	Трамвай (базовый сценарий)	Электробус ОС, ОНС	Троллейбус IMF, IMC
1	2	3	4
Опыт эксплуатации в Новополоцке	+ (с 1974 г.)	–	–

Окончание табл. 5
End of Table 5

1	2	3	4
Место хранения транспортных средств	+	+/-	+/-
	(Существующий трамвайный парк)	(Можно разместить в автобусном парке)	(Можно разместить в автобусном парке)
Эксплуатационная база (обслуживание и ремонт)	+	-	-
	(Достаточные производственные мощности)	(Необходимо создавать)	(Необходимо создавать)
Наличие существующей маршрутной сети электрического транспорта с перспективой дальнейшего развития	+	-	-
	(Имеется базовая трамвайная линия)		
Необходимость подготовки водителей	Для этапов 1.1–1.3 – нет; для этапов 2.1–2.4 необходимо обучение водителей категории F	Необходимо обучение водителей категории D	Необходимо обучение водителей категории I
Необходимость единовременной закупки транспортных средств для открытия новых линий	Не требуется	Требуется	Требуется
Приведенная стоимость транспортного средства (к 1 пассажиру пассажироместности), дол. США/пасс.	3,77	4,26–4,66	2,20–2,75
Срок эксплуатации транспортных средств – базовый (продленный), лет	15 (20)	10	10 (15)
Приведенная стоимость транспортного средства к 1 пассажиру пассажироместности и базовому 10-летнему сроку эксплуатации, дол. США/пасс.	2,51	4,26–4,66	2,20–2,75
Удельные затраты энергии на перевозку 100 пассажиров на 1 км в летнее время, дол. США/(100 пасс.·км)	0,11	0,18	0,18
Удельные затраты энергии (топлива) на перевозку 100 пассажиров на 1 км в зимнее время, дол. США/(100 пасс.·км)	0,16	0,42	0,29
Экологическая чистота	+	+/-	+/-
		(Выбросы вредных веществ при работе дизельного отопления, шин, резиновая пыль при взаимодействии колес с дорожным покрытием)	(Утилизация тяговых батарей, шин, резиновая пыль при взаимодействии колес с дорожным покрытием)
<i>Обозначения:</i> «+» – положительный эффект/наличие; «-» – отрицательный эффект/отсутствие; «+/-» – положительный и отрицательный эффекты/наличие и отсутствие.			

ВЫВОДЫ

1. Для организации движения нерельсового электрического транспорта необходимо приобретение транспортных средств, создание базы по их ремонту и обслуживанию в автобусных парках, строительство тяговых (и зарядных) подстанций и кабельных сетей, обучение пер-

сонала. Для троллейбусов IMF следует создавать контактную сеть по всей длине их маршрута, для троллейбусов IMC и дуобусов – частично. При организации движения электробусов необходимо строительство зарядных станций в депо и на конечных станциях (для электробусов ОС).

2. В случае организации новых линий движения трамваев требуется строить тяговые подстанции, прокладывать рельсовые пути, кабельные и контактные сети на новых участках, но нет необходимости приобретать новые трамваи и создавать базы для их ремонта и обслуживания.

Трамвай имеет самые низкие удельные расходы топливно-энергетических ресурсов на перевозку одного пассажира в летний и особенно зимний периоды года. Реализация этапов развития трамвайной сети приведет к увеличению доли городского электрического транспорта в перевозках пассажиров в Новополоцке за счет дополнительного годового объема перевозок около 4,1 млн пассажиров. При этом не потребуются капиталовложения в транспортные средства и создание эксплуатационной базы, поскольку можно использовать производственные мощности трамвайного парка, а также имеющиеся в наличии трамваи и базу для их ремонта и обслуживания.

3. Реализация этапов развития трамвайной сети позволит создать агломерационную транспортную систему с использованием рельсового электрического транспорта и увеличить годовой объем перевозок пассажиров электрическим транспортом на 6,7 млн пассажиров. Такая агломерационная система будет единственной в Беларуси и может стать одним из направлений развития туристического потенциала.

4. Повышение доли использования трамваев по предложенному в статье сценарию в Новополоцке и Полоцке и увеличение доли электротранспорта в Полоцке за счет организации движения троллейбусов ИМС на некоторых напряженных маршрутах со строительством контактной сети для зарядки накопителей энергии в этих троллейбусах на отдельных участках маршрута вне центральной части города будет способствовать улучшению экологической ситуации в них за счет снижения объема выбросов вредных веществ автобусами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад о состоянии безопасности дорожного движения в мире. Время действовать [Электронный ресурс] // Всемирная организация здравоохранения.

Женева, 2009. Режим доступа: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44122/2/9789244563847_rus.pdf. Дата доступа: 14.01.2019.

2. Аудит безопасности дорожного движения / Д. В. Капский [и др.]. Гомель: БелГУТ, 2015. 428 с.
3. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.
4. Врубель, Ю. А. Опасности в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский. М.: Новое знание, 2013. 244 с.
5. Капский, Д. В. Методология повышения качества дорожного движения / Д. В. Капский. Минск: БНТУ, 2018. 372 с.
6. Аспекты безопасности как основа совершенствования пассажирских перевозок трамваем путем применения транспортных средств повышенной вместимости (на примере г. Минска) / Д. В. Капский [и др.] // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. / отв. ред. Д. А. Захаров. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2018. Т. 1. С. 64–71.
7. Вибір оптимальної моделі збору та обробки інформації з метою реалізації диспетчерського управління рухом маршрутного пасажирського транспорту / Д. В. Капський [и др.] // Перспективні напрями розвитку регіональних транспортних та логістичних систем: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Харків: ХНАДУ, 2018. С. 125–129.
8. Залучення автомобільного перевізника в електронний документообіг як перспективний напрямок в області підвищення ефективності логістичних процесів / Д. В. Капський [и др.] // Перспективні напрями розвитку регіональних транспортних та логістичних систем: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. ХНАДУ. Харків, 2018. С. 130–135.
9. Повышение эксплуатационных показателей работы тормозных систем трамваев за счет улучшения устойчивости и управляемости тормоза / Д. В. Капский [и др.] // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XII Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 14 марта 2019 г. / отв. ред. Д. А. Захаров. Тюмень: Тюменский индустр. ун-т, 2019. Т. 1. С. 199–206.
10. Исследование режима движения трамваев на линии по ул. Красной – Я. Коласа – Логойскому тракту / Д. В. Капский [и др.] // Автомобиле- и тракторостроение: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Минск: БНТУ, 2018. Т. 2. С. 55–58.
11. Улучшение условий движения трамваев на ул. Красной – Я. Коласа – Логойском тракте средствами организации дорожного движения / Д. В. Капский [и др.] // Автомобиле- и тракторостроение: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Минск: БНТУ, 2018. С. 59–62.
12. Капский, Д. В. Оценка возможности использования троллейбусов и электробусов в Полоцке и Новополоцке / Д. В. Капский, Е. Н. Кот, С. С. Семченков // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XII Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участи-

ем, 14 марта 2019 г. / отв. ред. Д. А. Захаров. Тюмень: Тюменский индустр. ун-т, 2019. Т. 1. С. 266–273.

13. Техническое обслуживание и ремонт городского электрического транспорта. Нормы и правила проведения: ТКП 314–2011 (02190). Введ. 01.09.2011. Минск: Энергопресс, 2015. 47 с.

Поступила 05.09.2019

Подписана в печать 19.11.2021

Опубликована онлайн 31.03.2022

REFERENCES

1. Global Status Report on Road Safety. It's Time to Act. *World Health Organization*. Geneva, 2009. Available at: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44122/2/9789244563847_rus.pdf. (Accessed 14 January 2019) (in Russian).
2. Kapsky D. V., Azemsha S. A., Mozalevskii D. V., Skirkovskii S. V., Korzhova A. V., Polkhovskaya A. S., Ermakova N. S., Artyushevskaya S. N., Kuz'menko V. I. (2015) *Road Safety Audit*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 428 (in Russian).
3. Vruble Yu. A., Kapsky D. V., Kot E. N. (2006) *Determination of Traffic Losses*. Minsk, Belarusian National Technical University. 240 (in Russian).
4. Vruble Yu. A., Kapsky D. V. (2013) *Dangers in Traffic*. Moscow, Novoye Znanie Publ., 244 (in Russian).
5. Kapsky D. V. (2018) *Quality Improvement Methodology of Roadtraffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 372 (in Russian).
6. Kapsky D. V., Rynkevich S. A., Sedyukevich V. N., Semchenkov S. S. (2018) Safety Aspects as the Basis for Improving Passenger Transport by Tram Through the Use of Vehicles of Increased Capacity (for Example, the City of Minsk). *Organizatsiya i Bezopasnost' Dorozhnogo Dvizheniya: Materialy XI Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. T. 1* [Organization and Road Safety: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. Vol. 1]. Tyumen, Tyumen Industrial University, 64–71 (in Russian).
7. Kapsky D. V., Kot E. M., Rinkevich S. A., Semchenkov S. S. (2018) Selection of Optimal Model of Information Collection and Processing with the Purpose to Realize Dispatch Control of Route Passenger Transport Movement. *Perspektivni Napryami Rozvitku Regional'nikh Transporthnikh ta Logistichnikh Sistem: Materiali Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf.* [Perspective Directions for Development of Regional Transport and Logistics Systems: Proceedings of International Scientific and Practical Conference]. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University, 125–129 (in Ukrainian).
8. Kapsky D. V., Kot E. M., Rinkevich S. A., Semchenkov S. S. (2018) Involvement of a Road Carrier in Electronic Documents Turnover as a Promising Area in the Field of Improving the Efficiency of Logistics Processes. *Perspektivni Napryami Rozvitku Regional'nikh Transporthnikh ta Logistichnikh Sistem: Materiali Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf.* [Perspective Directions for Development of Regional Transport and Logistics Systems: Proceedings of International Scientific and Practical Conference]. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University, 130–135 (in Ukrainian).
9. Kapsky D. V., Kot E. M., Rinkevich S. A., Semchenkov S. S. (2019) Improving the Performance of Tram Braking Systems Due to Better Stability and Controllability of the Brake. *Organizatsiya i Bezopasnost' Dorozhnogo Dvizheniya: Materialy XII Nats. Nauch.-Prakt. Konf. s Mezhdunar. Uchastiem, 14 Marta 2019 g. T. 1* [Organization and Road Safety: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference with International Participation, March 14, 2019, Vol. 1]. Tyumen, Tyumen Industrial University, 199–206 (in Russian).
10. Kapsky D. V., Kot E. M., Romeiko V. Yu., Semchenkov S. S. (2018) Study of Tram Movement Mode on the Line Krasnaya Street – Ya. Kolas Street – Logoisk Tract. *Avtomobile- i Traktorostroenie: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. T. 2* [Automotive- and Tractor Construction: Proceedings of International Scientific and Practical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 55–58 (in Russian).
11. Kapsky D. V., Kot E. M., Romeiko V. Yu., Semchenkov S. S. (2018) Improving the conditions for Trams on the Line Krasnaya Street – Ya. Kolas Street – Logoisk Tract by Means of Traffic Management. *Avtomobile- i Traktorostroenie: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. T. 2* [Automotive- and Tractor Construction: Proceedings of International Scientific and Practical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 59–62 (in Russian).
12. Kapsky D. V., Kot E. M., Semchenkov S. S. (2019) Assessment of the Possibility to use Trolleybuses and Electric Buses in Polotsk and Novopolotsk. *Organizatsiya i Bezopasnost' Dorozhnogo Dvizheniya: Materialy XII Nats. Nauch.-Prakt. Konf. s Mezhdunar. Uchastiem, 14 Marta 2019 g. T. 1* [Organization and Road Safety: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference with International Participation, March 14, 2019, Vol. 1]. Tyumen, Tyumen Industrial University, 266–273 (in Russian).
13. ТКП [Technical Code of Common Practice] 314–2011 (02190). *Maintenance and Repair of Urban Electric Transport*. Minsk, Energo-Press Publ., 2015. 47 (in Russian).

Received: 05.09.2019

Accepted: 19.11.2021

Published online: 31.03.2022

Statistical Analysis of Industrial Processes

T. I. Chepeleva¹⁾, A. N. Chepelev²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus (Minsk, Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Abstract. To analyze the synchronization of machine-building production processes, a statistical approach is used on the correctness of the choice of parameters. The accuracy of the parameters is achieved by modeling. This method allows checking how correctly the parameters are selected and whether they ensure uninterrupted operation of production. Statistical analysis of parameters gives information on failures in a particular production unit, on violations of the synchronization of production processes, technological processes. With the help of statistical characteristics, it is possible to evaluate production as a whole. Statistical multidimensional analysis of complex production data allows to analyze the work of individual units, production blocks. The cluster analysis has been carried out by the method of *K*-medium production process with minimization of the total error probability. A geometric interpretation of the results of cluster analysis of production processes is given in the paper. The influence of factors on the work of production has been determined in the paper. The index factorial method with a different comparison base and different weights has been applied. The hypothesis about the adequacy of the model of production processes has been tested. A statistical analysis of the complex data of the production process has been carried out in the search for optimal solutions in the case of uncertainty and in conditions of risk using the following methods: Bayes, Laplace and Germeyer using the simplex method. The network methods of decision-making have been used in the paper. Statistical methods with the help of mathematical modeling have substantiated the optimal sizes of both individual parts and volumes of local warehouses, so that there were no delays in the transfer of production processes, disruptions in work, downtime of working equipment. In this case, the criterion for the optimality of production volumes can be the minimum of total losses from idle time of individual units and production blocks to the possibility of disruption of the synchronous process modes due to lack of equipment (arising production pockets) or due to long-used outdated units.

Keywords: processes, statistical analysis, modeling, factors

For citation: Chepeleva T. I., Chepelev A. N. (2022) Statistical Analysis of Industrial Processes. *Science and Technique*. 21 (2), 158–163. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-158-163>

Статистический анализ производственных процессов

Канд. техн. наук, доц. Т. И. Чепелева¹⁾, А. Н. Чепелев²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Академия управления при Президенте Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Для анализа синхронизации процессов машиностроительного производства используется статистический подход о правильности выбора параметров. Точность величин достигается путем моделирования. Данный способ позволяет проверить, насколько правильно выбраны параметры и обеспечивают ли они бесперебойную работу производства. Статистический анализ величин дает информацию о сбоях в том или ином узле производства, о нарушениях синхронизации процессов производства, технологических процессов. С помощью статистических характеристик можно оценить производство в целом. Статистический многомерный анализ сложных данных о производстве позволяет анализировать работу отдельных узлов и блоков производства. Проведен кластерный анализ методом *K*-средних процессов производства с минимизацией полной вероятности ошибки. Дана геометрическая интерпретация результатов кластерного анализа процессов производства. Определено влияние факторов на работу производства. Применен индексный факторный метод с различной базой сравнения и разными весами. Проведена проверка гипотезы об адекватности модели процессов производства. Выполнен статистический анализ сложных данных процесса производства при поиске оптимальных решений в случае неопределенности и в условиях риска методами Байеса, Лапласа и Гермейера с помощью симплекс-метода. Используются сетевые методы принятия решений. Статистическими

Адрес для переписки

Чепелева Тереса Иосифовна
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-80-75
tchepeleva@gmail.com

Address for correspondence

Chepeleva Teresa I.
Belarusian National Technical University
9, B. Khmel'nitsky str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-80-75
tchepeleva@gmail.com

методами посредством математического моделирования провели обоснование оптимальных размеров как отдельных деталей, так и объемов местных складов, чтобы не было опозданий в работе передачи процессов производства, срывов в работе, простоев оборудования. В этом случае критерием оптимальности объемов производства может служить минимум суммарных потерь от простоя отдельных узлов и блоков производства до возможности нарушения режимов синхронного процесса из-за нехватки оборудования (возникших карманов производства) или из-за давно используемых устаревших агрегатов.

Ключевые слова: процессы, статистический анализ, моделирование, факторы

Для цитирования: Чепелева, Т. И. Статистический анализ производственных процессов / Т. И. Чепелева, А. Н. Чепелев // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 158–163. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-158-163>

Introduction

Statistical methods are widely used in the industrial complex, which is very important at the stages of designing machines, creating them, producing them, operating them. Statistical analysis is used both for the formation of the industrial complex itself, and for the creation of separate equipment, parts, separate nodes. All technical tasks are continuously connected with the economic and social direction of the country. The presented work has a socio-economic direction. The strength and reliability of manufactured machines is a global pressing issue of our time. The work of the industrial complex should be first of all uninterrupted, it requires appropriate preliminary competent calculations, clearly reflecting the issues raised. Algorithmization of the production processes of the industrial complex was carried out, and then a statistical study was conducted on the created algorithms.

Materials and results of studies

The production process is carried out by people who own modern technology, i. e. it is a set of actions of personnel and equipment, resulting in new machines, or kits, parts to them, the necessary planned ready-made products within a certain time frame with minimal defect. Statistical analysis allows us to solve these problems even at the design stage of both individual parts, a separate machine, and the entire industrial complex [1–3]. Statistical analysis evaluates the reliability and risk of equipment failure, determines the suitability of production processes.

The work describes the mathematical apparatus, which allows to determine the efficiency of the enterprise, the effectiveness of competing processes of a multi-structural resource for the production of machines at the design stage of

machines. A mathematical model of the distributed processing of competing processes of a production resource is obtained, which can be used to solve managerial issues in the manufacture of machines.

Let's look at the parallel distributed and consistent execution of production processes. An industrial complex, an enterprise must operate smoothly like a powerful computer. Let it a – a time used by a variety of distributed competing processes to organize the parallel use of the working blocks of a multi-structure production resource, $a > 0$; n – a variety of different competing processes; p – the number of intellectual performers; v – the number of work blocks; B_j – a set of work blocks ($j = \overline{1, v}$, $j = \overline{1, n}$); a_{ij} – time to execute j production blocks by i competing processes $j = \overline{1, v}$; $i = \overline{1, n}$, $2 \leq v \leq p$.

Let the system of competing multi-structure resource processes are equally distributed, i. e. have the same duration of production processes. Therefore, there is a coincidence by the time of each of i

processes: $a_{i1} = a_{i2} = \dots = a_{iv} = a_i$. Let $t^n = \sum_{i=1}^n a_i$ –

the total run time each of the operating B_j units by

all n processes; a variety $a = a(a_1, a_2, \dots, a_n, t^n)$ –

the characteristic set of this system; $F(t_a^n) = a$,

$t_{m-1}^\alpha \leq t_m^\alpha \geq t_{m+1}^\alpha$, $m = \overline{1, n}$, where α – the time spent

on organizing the parallel use of multi-structure production resource units by a variety of distributed competing workflows, $\alpha > 0$. It proved, that then the minimum total time to perform a plurality of equally distributed competing workflows respectively in serial mode and two parallel distributed modes coincide, otherwise $t_{pr}^1 > t_{pos}^3 = t_{pr}^2$,

where t_{pr}^1, t_{pr}^2 – minimum total time (it's two of

them) of parallel production mode; t_{pos}^3 – sequential. Indeed, if $a_m^\alpha = \max_{1 \leq i \leq n} a_i^\alpha$, then for the third sequential and the second parallel distributed production modes, $t_{pos}^3 = t_{pr}^2 = t_\alpha^n + (\nu - 1)a_m^\alpha$ equality occurs. In this case, every work unit is continuously performed by all n processes for any characteristic set of the system a .

Within 1st parallel distributed mode with continuous execution by multi resource production operating units within each of the processes, their interaction and control subordinate algorithm:

$$t_{pr}^1 = t_\alpha^n + (\nu - 1) \left(a_\alpha^n + \sum_{i=2}^n \max \{ a_{i-1}^\alpha - a_i^\alpha, 0 \} \right). \text{ Then } a_n^\alpha +$$

$$+ \sum_{i=2}^n \max \{ a_{i-1}^\alpha - a_i^\alpha, 0 \} = a_m^\alpha. \text{ But } a_m^\alpha = \max_{1 \leq i \leq n} a_i^\alpha, \text{ then}$$

$$\text{when } 1 \leq i \leq m \leq n \text{ equality } \sum_{i=2}^m \max \{ a_{i-1}^\alpha - a_i^\alpha, 0 \} =$$

$$= 0 \text{ is true, and for } 1 \leq m \leq i \leq n - \text{equality}$$

$$\sum_{i=m+1}^n \max \{ a_{i-1}^\alpha - a_i^\alpha, 0 \} = a_m^\alpha - a_n^\alpha. \quad a_n^\alpha + \sum_{i=2}^n \max \times$$

$$\times \{ a_{i-1}^\alpha - a_i^\alpha, 0 \} = a_n^\alpha + a_m^\alpha - a_n^\alpha = a_m^\alpha \text{ and } a_n^\alpha +$$

$$+ \sum_{i=2}^n \max \{ a_{i-1}^\alpha - a_i^\alpha, 0 \} - \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\alpha > 0.$$

Systems, which satisfy equations of the form: $a_{i1} = a_{i2} = \dots = a_{in} = a_i, i = \overline{1, n}$, called stationary, while they are effective at $p, \nu \geq 2$ if systems of competing processes of manufacture are equally distributed and the following relation $\nu t^n - t(p, n, \nu, \alpha) = \Delta_\alpha(n) > 0$ fulfill, where νt^n – time of the execution of the working units of manufacture $B_j, j = \overline{1, \nu}$ by all n processes in serial mode.

It is proved that if the production system operates in three modes: sequential and two parallel distributed, then for identically distributed competing production processes, the minimum total time, taking into account production delays and costs, is calculated by the formula

$$t(p, n, \nu, \alpha) = t_\alpha^n + (\nu - 1)a_{\max}^\alpha,$$

$$\text{where } t_\alpha^n = \sum_{i=1}^n a_i^\alpha; \quad a_{\max}^\alpha = \max_{1 \leq i \leq n} a_i^\alpha; \quad a_i^\alpha = a_i + \alpha.$$

For an effective, equally distributed production system of competing workflows, exists a more efficient stationary equally distributed system, that satisfies the relations $\nu n \geq 2(n + \nu - 1), 0 < \alpha \leq \min_{1 \leq i \leq n} a_i, n = \nu, p \geq \nu > 3$.

The opposite is true: an equally distributed production system of competing processes, with n, ν, p, α parameters that satisfies these relations, is effective. Indeed, if there are two effective equally distributed production systems of competing processes, it is said that the former is more effective than the second, if the value $\Delta_\alpha(n)$ of the first system is no greater than the corresponding value of the second.

Let there be an effective equally distributed production system, then, based on its effectiveness, inequality is true

$$\Delta_\alpha(n) = (\nu - 1)(t^n - a_{\max}^n) - (n + \nu - 1)\alpha \geq 0,$$

$$\text{where } a_{\max}^n = \max_{1 \leq i \leq n} t_i,$$

and for any stationary distributed production system, it's valid:

$$\Delta_\alpha^c = (\nu - 1)(t^n - a) - (n + \nu - 1)\alpha > 0,$$

$$\text{where } a = t^n / n.$$

It's easy to prove that $\Delta_\alpha^c(n) \leq \Delta_\alpha(n)$ by substituting instead $\Delta_\alpha(n)$ and Δ_α^c corresponding values. Transforming the resulting expression, we will have: $(n - 1)a \leq t^n - t_{\max}^n$, since for a stationary, equally distributed system is valid $a = \min_{1 \leq i \leq n} a_i = a_{\min}^n$. Let for definiteness $a_{\max}^n = a_m$, then the following relationship is true:

$$t_n - a_{\max}^n = \sum_{i=1}^{m-1} a_i + \sum_{j=i+1}^n a_j \geq (n - 1)a_{\min}^n = (n - 1)a.$$

Let us prove the converse statement. Condition of the efficiency of production is equivalent to the inequality: $\frac{t^n - a_{\max}^n}{\alpha} \geq \frac{n + \nu - 1}{\nu - 1}$. We can verify directly that of the ratio $0 < \alpha < \min_{1 \leq i \leq n} a_i$ results

a chain of inequalities: $\frac{t^n - a_{\max}^n}{\alpha} \geq \frac{(n-1)a_{\max}^n}{\alpha} \geq n-1$, as by the choice α follows the inequality $\frac{a_{\min}^n}{\alpha} \geq 1$. The inequality $n-1 \geq \frac{n+\nu-1}{\nu-1}$ follows from the expression $\nu n \geq 2(n+\nu-1)$.

It is proved that in order to equally distributed production system competing work processes to be effective, it is necessary and sufficient that the following conditions are satisfied:

$$\alpha \leq \begin{cases} f(1+\sqrt{\nu}), \sqrt{\nu}\text{-integer,} \\ \max\{f(1+\lceil\sqrt{\nu}\rceil), f(2+\lceil\sqrt{\nu}\rceil)\}, \\ \sqrt{\nu}\text{-non-integer;} \end{cases}$$

$$f(x) = \frac{(\nu-1)t^n(x-1)}{x(x+\nu-1)},$$

where $[x]$ – is the largest integer not exceeding x .

A production system with equally distributed competing workflows will be effective when $p = \nu = 2$, if $\frac{\alpha}{t^n} \leq \frac{n-1}{n(n+1)}$.

Production modes are classified into synchronous, asynchronous and combined. The synchronous production mode is a mode of sequential execution of all production processes without delay. Asynchronous mode is a mode of execution of production processes in violation of sequential cycles, with delays. For statistical research, this process can be considered as a discrete random vector [4, 5]. Asynchronous production mode leads to a number of negative consequences in production: accumulation of unnecessary products in warehouses and long-term storage; reducing the overall speed of the process and production efficiency; loss of work schedule, customers, working hours, usable area, etc. [6].

Suppose that the interaction of production processes, work processors and blocks is subject to the following conditions: none of the resource blocks can be processed simultaneously by more than one processor, and none of the processors can process more than one block at a time if each of them is processed without interruptions; the procedure

for providing processor to processes is cyclical; a block is ready for execution if it is not running on any of the processors. Then when $n = kp$ minimum total time $T(p, n, s)$ of execution of the set of competing heterogeneous production processes determined by the critical path length in the network vertex-weighted graph, given by matrix A^* , in which starting and ending vertices of the graph – are the first and last elements of the matrix.

Let $T(p, n, s)$ be the minimum total execution time of all n concentrated processes $n \geq 2$ from the moment of the beginning of the first and to the moment of completion of the latter within an asynchronous production process. If $k = 1$, then $n = p$. In this case, it is enough to consider the execution of p processes on p processors. According to the matrix $A_{p \times s} = [t_{ij}]$, $i = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, s}$, we obtain network vertex-weighted graph with the number of vertices $p \times s$. The vertices and arcs of the graph must match the nodes and arcs of the rectangular grid $p \times s$. Horizontal arcs in a graph indicate connections between production units, and vertical ones – a linear order of production processes. Let the numbering of the vertices and their weight – are the relevant elements a_{ij} of the matrix A^* , $i = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, s}$, where a_{ij} – production units. If $n > p$, then:

$$\begin{cases} n = kp, & \text{if } k > 1; \\ n = kp + r, & \text{if } k \geq 1, 1 \leq r < p. \end{cases}$$

Suppose $n = kp$, then we divide the matrix $A_{p \times s}$ into k block matrices with dimensions $p \times s$ of each, as a result n production processes are divided into k groups of p processes in each. For each of the block matrices, i. e. submatrices $A_{p \times s}^{(m)}$, $m = \overline{1, k}$, we construct k linear diagrams Gantt. Each of the diagrams displays in time the execution of the next p_k processes with the help of PR_k processors, $k = \overline{1, p}$.

The execution of the next group of p_k processes should begin after the completion of the previous group. The total sum of the execution time of all P_i ($i = \overline{1, n}$) the processes in this case is defined as the sum of the lengths of critical paths in each of successive misalignment diagrams Gantt defined

by a straight sum of matrices $A_{p \times s}^{(m)}$ ($m = \overline{1, k}$). To reduce time, you must use the technique of combining k – sequential diagrams along the time axis from right to left. It should be taken into consideration that the combination, starting from the second diagram, is carried out at the maximum possible value so that the technological conditions for the execution of many processes and production units are not violated. Block resultant matrix A^* of execution times of the blocks of resource production with taking into the account the maximum consecutive overlapping diagrams, has blocks of submatrix $A_{p \times s}^{(m)}$ ($m = \overline{1, k}$). In this case, the submatrix $A_{p \times s}^{(m)}$ in the resulting matrix A^* is positioned so that the nature of the interaction of the production resource blocks not violated, performed both using the same processor – an intelligent machine (as indicated by the horizontal connections between the blocks), so and by other processors (it's vertical communication). The first row of the matrix A^* consists of blocks of submatrices $A_{p \times s}^{(m)}$, which reflects the nature of the interaction of resource blocks and processes, using the same processors, and this, as a rule, is the intellectual resources of production. The step of combining diagrams is determined by the corresponding displacement of blocks (submatrices) $A_{p \times s}^{(m)}$ matrix A^* . An offset for vertical communications occurs starting from the first row, so that the next row, whose elements are blocks (submatrices) of the form $A_{p \times s}^{(m)}$ is shifted from right to left by the maximum value that does not violate the linear order of the execution of the same blocks for different production processes. Since all blocks (submatrices) $A_{p \times s}^{(m)}$ have the same dimensions $p \times s$, the displacement at each step is equal to the value s . Instead of the rightmost submatrix (block) shifted at each step, zeros are set. Having thus completed the $(k - 1)$ step of shifting, we obtain the matrix structure A^* corresponding to the combined Gantt diagram. The matrix A^* takes into account both all horizontal connections between blocks and all vertical ones, as well as connections between blocks from Gantt diagrams. Matrix A^* as a block is symmetrical about

a second upper triangular diagonal, type Hankel order k , is:

$$A^* = \begin{pmatrix} A^{(1)} & A^{(2)} & A^{(3)} & \dots & A^{(k-1)} & A^{(k)} \\ A^{(2)} & A^{(3)} & A^{(4)} & \dots & A^{(k)} & 0 \\ A^{(3)} & A^{(4)} & A^{(5)} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A^{(k-1)} & A^{(k)} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ A^{(k)} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

where $A_{p \times s}^{(m)}$ ($m = \overline{1, k}$) – matrix of the form:

$$A_{p \times s}^{(m)} = \begin{pmatrix} a_{11}^{(m)} & a_{12}^{(m)} & \dots & a_{1s}^{(m)} \\ a_{21}^{(m)} & a_{22}^{(m)} & \dots & a_{2s}^{(m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{p1}^{(m)} & a_{p2}^{(m)} & \dots & a_{ps}^{(m)} \end{pmatrix}.$$

In the general case, the description of production processes at $n = kp$ will be given by the matrix $A_{kp \times ks}^*$. In this case, as with $n = p$, a vertex-weighted network graph is constructed with the weights given by the matrix $A_{kp \times ks}^*$. The vertices of the graph are located at the nodes of the rectangular grid $(kp \times ks)$. Obviously, the weights of the vertices corresponding to zero values of the matrix $A_{kp \times ks}^*$, including the final vertex with a number (kp, ks) , are equal to zero. Graph defined by the matrix $A_{kp \times ks}^*$, fully displays in time the execution of $n = kp$, $k > 1$ processes and thus account for all possible connections between the blocks, the production processes and processors, given by the conditions of their interaction [7, 8]. If the number of production processes is not a multiple of the number of processors, i. e. $n = kp + r$, $1 \leq r \leq (p - 1)$, then the matrix of production execution times of the resource block $A_{(k+1)p \times (k+1)s}$ is constructed similarly as in the case $n = kp$. The block matrix (submatrix) $A_{(k+1)p \times (k+1)s}$ will contain $(p - r)$ zero rows. The minimum total runtime $T(p, kp + r, s)$ of a variety of heterogeneous competing processes in this case is also determined by the length of the critical path in the corresponding network graph.

CONCLUSIONS

1. The results can be used to study reliability systems, which is very important at the stage of designing transport vehicles and for solving problems of optimal use of a multi-structure production resource. The results can also be used to determine the profitability of machine production.

2. To analyze the production process synchronization used statistical approach to the correctness of the selection parameters. Simulation approach allows you to test how much exactly parameters are selected and whether they ensure the smooth operation of production. Statistical analysis of the parameters gives information about failures and about violations of the synchronization of production processes. Statistical estimates are obtained, allowing to evaluate production as a whole [9–11].

3. The cluster analysis was carried out using method of the K-average production processes with minimization of the total error probability. The influence of the principal factors on the work of production is determined. A statistical analysis of the complex data of the production process was carried out in the search for optimal solutions in case of uncertainty and under risk conditions using the following methods: Bayes, Laplace, Germeyer using the simplex-method [12–14].

4. Used network decision-making methods. Statistical methods used with the method of mathematical modeling for further substantiating the optimal size of both individual parts and the volume of local warehouses so that there are no delays in the work of transferring production processes, disruptions in work, and downtime of working equipment. Production processes are considered at different intervals: continuous and discrete. When modeling the production process in this case, impulse functions were used.

5. Concentrated and distributed competing processes, a method of structuring the resources of engineering production are considered. Probabilistic characteristics of the output process are got by

solving the auxiliary deterministic task with standard actions on random functions.

REFERENCES

1. Dashchinskaya N. P. (2008) *Statistics of the Enterprise*. Minsk, Belarusian State University. 301 (in Russian).
2. Rao S. R. (1968) *Linear Statistical Methods and their Application*. Moscow, Nauka Publ., 548 (in Russian).
3. Borovikov V. P. (2003) *Statistica. The art of Analyzing Data on a Computer*. St. Petersburg, Piter Publ., 688 (in Russian).
4. Miller B. N. (2002) *Theory of Random Processes*. Moscow, Fizmatlit Publ., 320 (in Russian).
5. Chepeleva T. I. (2011) Stability of the Production Process of Transport Machines. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (1), 64–67 (in Russian).
6. Dombrovsky V. V., Bunny V. M. (1998) *Asynchronous Machines: Theory, Calculation, Design Elements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningrad Department. 368 (in Russian).
7. Diestel R. (2017) *Graph Theory*. Springer. 410. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53622-3>.
8. Swamy M. N. S., Thulasiraman K. (1992) *Graphs: Theory and Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118033104>.
9. Day M. V. (2006) Boundary-Influenced Robust Controls: Two Network Examples. *ESAIM: Control, Optimization and Calculus of Variations*, 12 (3), 662–698. <https://doi.org/10.1051/cocv:2006016>.
10. Chen S. P., Tsai M. J. (2011) Time-Cost Trade-Off Analysis of Project Networks in Fuzzy Environments. *European Journal Operational Research*, 212, 386–397. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.02.002>.
11. Khadzaragova Ye. A. (2015) On Methods of Scalarization of Vector Estimates in Multicriteria Optimization Problems. *Fundamental'nyye i Prikladnyye Issledovaniya = Fundamental and Applied Research*, (18), 123–127 (in Russian).
12. Himmelblau D. (1972) *Applied Nonlinear Programming*. New York, McGraw-Hill. 498.
13. Khoroshev A. N. (1999) *Introduction to the Design Management of Mechanical Systems. Study Guide*. Belgorod. 372 (in Russian).
14. Andrews G. R. (2000) *Foundations of Multithreaded, Parallel, and Distributed Programming*. Reading, Mass: Addison-Wesley. 664.

Received: 17.06.2021

Accepted: 07.09.2021

Published online: 31.03.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174>

УДК 662.8.05

Исследование энергетических характеристик многокомпонентного твердого топлива с использованием некондиционных горючих коммунальных и производственных отходов

Канд. техн. наук А. Н. Пехота¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Рассмотрены основные направления концепции национальных стратегий устойчивого развития с учетом проблем энерго- и ресурсосбережения, а также необходимости рационального использования природных и вторичных ресурсов во многих странах мирового сообщества с целью перехода к «зеленой» экономике. Дана оценка энергетического потенциала горючих отходов, не нашедших технологического применения, как одного из приоритетных направлений в области нетрадиционной энергетики. Представлены аспекты исследований получения и производства многокомпонентного твердого топлива. Описана технология брикетирования влажных смесей с добавлением различных связующих, в том числе разнообразных горючих отходов, с целью получения твердого топлива. Отмечены особенности формирования каркаса топлива с учетом факторов, влияющих на производительность брикетирующей установки, а также достижения оптимальной плотности брикета. Выполнена качественная оценка различных соотношений компонентов брикетируемого топлива, при которых достигаются наилучшие производственные и потребительские показатели. Рассмотрены особенности подготовки материалов и применяемого технологического оборудования, работающего в составе линии подготовки и брикетирования. Изложены практические аспекты производства, сушки, использования брикетированного твердого топлива. Исследованы энергетические и физико-химические характеристики многокомпонентных составов топлива с применением разных методик и лабораторного оборудования. Предложенный алгоритм решения поставленной задачи позволяет рационально использовать некондиционные горючие производственные отходы для получения многокомпонентного твердого топлива, при этом на стадии производства учитываются энергетические и экологические аспекты.

Ключевые слова: отходы, твердое топливо, многокомпонентный состав, связующее, осадок сточных вод, нефте-содержащие отходы, теплота сгорания, технология брикетирования, выбросы, энергоресурсы, древесные отходы

Для цитирования: Пехота, А. Н. Исследование энергетических характеристик многокомпонентного твердого топлива с использованием некондиционных горючих коммунальных и производственных отходов / А. Н. Пехота // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 164–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174>

Адрес для переписки

Пехота Александр Николаевич
Белорусский государственный университет транспорта
ул. Кирова, 34,
246653, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 23 231-93-45
1555522@mail.ru

Address for correspondence

Pekhota Alexander N.
Belarusian State University of Transport
34, Kirov str.,
246653, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 23 231-93-45
1555522@mail.ru

Study of Energy Characteristics of Multicomponent Solid Fuel Using Substandard Municipal and Industrial Waste Fuels

A. N. Pekhota¹⁾

¹⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The main directions of the concept of national strategies for sustainable development are considered, taking into account the problems of energy and resource saving, as well as the need for the rational use of natural and secondary resources in many countries of the world community in order to transition to a “green” economy. An assessment of the energy potential of combustible waste that has not found technological application is given as one of the priority areas in the field of non-traditional energy. The paper presents aspects of research into obtaining and production of multicomponent solid fuels. A technology is described for briquetting wet mixtures with the addition of various binders, including various combustible wastes, in order to obtain solid fuel. The features of the fuel frame formation are given, taking into account the factors affecting the performance of the briquetting plant, as well as achieving the optimal density of the briquette. A qualitative assessment was made with respect to various ratios of the components of briquetted fuel, at which the best production and consumer indicators are achieved. The features of the preparation of materials and the technological equipment used as part of the preparation and briquetting line are considered. The practical aspects of the production, drying, use of briquetted solid fuels are outlined in the paper. The paper presents studies of the energy and physico-chemical characteristics of multicomponent fuel compositions using various research laboratory equipment and methods. The proposed algorithm for solving the problem makes it possible to rationally use substandard combustible production waste to obtain multicomponent solid fuel, while energy and environmental aspects are taken into consideration at the production stage.

Keywords: waste, solid fuel, multicomponent composition, binder, sewage sludge, oily waste, calorific value, briquetting technology, emissions, energy resources, wood waste

For citation: Pekhota A. N. (2022) Study of Energy Characteristics of Multicomponent Solid Fuel Using Substandard Municipal and Industrial Waste Fuels. *Science and Technique*. 21 (2), 164–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174> (in Russian)

Введение

Многие страны в рамках развития концепции национальных стратегий устойчивого развития осуществляют стремительный переход к «зеленой» экономике, которая направлена на сохранение благополучия общества за счет эффективного использования природных и материальных ресурсов. При этом основные усилия прилагаются в области разработки и внедрения технологий, обеспечивающих возвращение продуктов конечного пользования в производственный цикл. Все больше внедряемые технологии «зеленой» экономики направлены на экономное потребление тех ресурсов, которые в настоящее время подвержены истощению (невозобновляемые полезные ископаемые – нефть, газ, уголь и др.), и рациональное использование возобновляемых ресурсов.

Вполне очевидно, что стратегия перехода к «зеленой» экономике не может содержать универсальных для всех стран приемов. Она во многом зависит от сложившихся политических, технологических и социальных условий, уров-

ня развития, обеспеченности природными ресурсами и других факторов. Учитывая глобальные изменения топливно-энергетического рынка, особенно в последние годы, многие страны уделяют значительное внимание технологиям, обеспечивающим эффективное использование производственных, коммунальных отходов и биомассы с применением технологий сжигания и получения топлива. Такие достижения в использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в энергетике возможны только за счет накопленного исследовательского, технологического и практического опыта вовлечения горючих производственных и коммунальных отходов, а также биомассы как источников химической энергии. Так, согласно данным экспертной оценки ООН, ежегодно из недр Земли извлекается около 100 млрд т полезных ископаемых. В то же время на планете скопились сотни миллиардов тонн промышленных отходов. Не лучше ситуация и с использованием твердых коммунально-бытовых отходов. Ожидается, что к 2030 г. человечеству потребуется на 50 % больше продовольствия и соответствен-

но различных минерально-сырьевых ресурсов, чем сегодня. В связи с ростом населения и развитием мировой экономики к 2035 г. глобальное потребление энергии увеличится примерно на 50 % [1].

Таким образом, уже в обозримом будущем многие государства, в первую очередь с развитой системой экономики и производства, начнут испытывать дефицит в энергетических ресурсах. Все это свидетельствует об остроте проблем энергосбережения, а также о необходимости рационального использования природных и вторичных ресурсов во всех странах мирового сообщества. В то же время последними исследованиями установлено, что экономически оправданное применение горючих бытовых и производственных отходов как энергетического топлива позволяет экономить не менее 26 % мировой энергетической потребности, причем для развивающихся стран этот процент экономии будет коррелироваться только в большую сторону.

Аспекты применения искусственных видов твердого топлива

Производства альтернативных видов топлива ориентируются на выработку недорогих энергоресурсов с использованием энергоэффективных, ресурсосберегающих технологий и различных отходов, что в большинстве случаев обеспечивает сокращение объемов образования отходов. Направление деятельности и виды отходов могут различаться и иметь свои особенности. Однако, учитывая, что одним из доступных источников для многих стран являются отходы коммунального хозяйства и биомасса различного происхождения, основное внимание при разработке технологии уделяется их использованию с последующим термическим применением. Это, безусловно, разумно в условиях формирующихся тенденций перехода в перспективе к «циркулярной» экономике.

Стоит отметить, что развитые страны активно разрабатывают различные составы, производят и сжигают твердое восстановленное топливо (англ. refuse-derived fuel – RDF), которое преимущественно получается с использованием твердых бытовых отходов (ТБО). Оно состоит в основном из горючих компонентов ТБО, таких как пластик и биоразлагаемые отходы. Технологии производства альтернативного RDF-топлива в разных странах и регионах

имеют различия. Использование его, как правило, предусмотрено на промышленных предприятиях. Теплотворная способность RDF-топлива в различных странах с применением разных технологий составляет 13–23 МДж/кг [2].

Вместе с тем, несмотря на принимаемые меры, объем образования горючих промышленных отходов ежегодно увеличивается, а использование некоторых в значительной степени затруднено ввиду отсутствия экономически выгодных и экологически безопасных технологий, обеспечивающих их переработку и рациональное применение. С начала 2000-х гг. в республике ведутся работы по созданию аналога RDF-топлива, которое авторами [2–5] названо многокомпонентным твердым топливом (МТТ), (англ. multicomponent solid fuel – MSF) [6], в составе которого используются горючие отходы, не нашедшие применения в других технологиях.

В основу метода брикетирования положены научные способы подбора многокомпонентных составов, учитывающие структурно-реологические свойства отходов, брикетизируемость многокомпонентной смеси в заданном интервале значений под воздействием давления и с учетом влажности, а также других факторов. При этом учитывается экологически приемлемое соотношение компонентов в составе брикета для минимизации экологических последствий от его применения в качестве топлива с учетом действующих требований.

Научные основы получения MSF-топлива

Поскольку в МТТ входят вещества с различным набором свойств, которые могут быть получены разнообразными способами путем смешивания тех или иных исходных материалов в разных пропорциях, возникает ряд задач по оптимизации многокомпонентных смесей. Суть этих задач заключается в расчете таких дозировок смешиваемых веществ, которые, минимизируя расход связующих веществ (отходов), позволяют готовить смеси требуемого состава при соблюдении технологических и ресурсных ограничений. В связи с общей тенденцией возрастания неоднородности вовлекаемых в производство топлива отходов на первый план выступает сложная задача получения стабильных характеристик смесей в условиях значительных вариаций состава

смешиваемых материалов, что эффективно достигается в процессе экспериментов.

Важным элементом любого исследования является проведение эксперимента – основного и наиболее совершенного метода изучения объекта или процесса. Так, автор всесторонне изучил двухкомпонентные составы [2–5, 7], что позволило на практике определить оптимальные параметры времени брикетирования брикета P с учетом различных факторов, влияющих на производительность.

В основу научного эксперимента положено определение факторов зависимости оптимальной производительности и плотности при различных процентных содержаниях формуемой смеси, состоящей из осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c при массовой влажности смеси в пределах 38–42 %. Давление прессования и температура сырья во время эксперимента не изменялись.

Установка для получения твердого топлива на основе осадка сточных вод, древесных отходов и отходов нефтепродуктов рассматривалась как «черный ящик», имеющий управляемые независимые входные (факторы) и выходные (отклики системы) параметры. При используемом подходе моделировалось внешнее функционирование установки по принципу «черного ящика» (рис. 1), где a, z, c – входные переменные (факторы); P, U – выходные переменные (отклики системы); ξ – ошибка, помеха, вызываемая наличием случайных факторов; φ – оператор, моделирующий действие реальной системы, определяющий зависимость отклика от факторов; ξ_P, ξ_U – ошибка измерения P, U , вызванная наличием случайных факторов; φ_P, φ_U – оператор, определяющий зависимость откликов P и U системы от факторов.

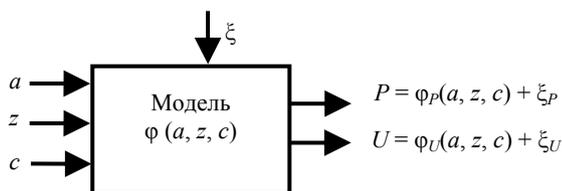


Рис. 1. Кибернетическое представление эксперимента

Fig. 1. Cybernetic representation of the experiment

Математическая модель протекающего в установке технологического процесса по производству твердого топлива формировалась по

результатам экспериментов в виде уравнения множественной регрессии. Принимали количество факторов $k = 3$ (осадки сточных вод a , древесные отходы z и отходы нефтепродуктов c), т. е. рассматривали трехмерное факторное пространство, вследствие чего для каждого фактора выбирали два уровня – верхний и нижний, на которых факторы варьировались. В этом случае для каждого из n факторов общее число опытов составляло $N = 2^n$, а полный факторный эксперимент – это эксперимент типа 2^n . Геометрической интерпретацией факторного эксперимента 2^3 является куб (рис. 2).

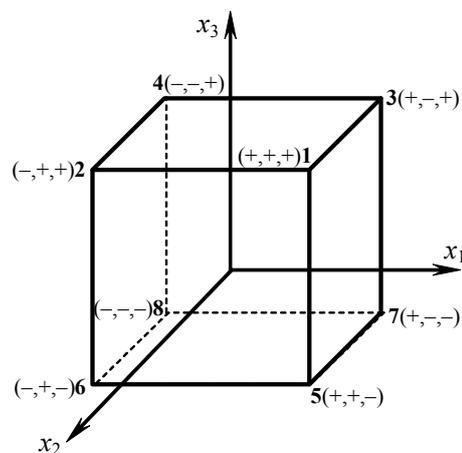


Рис. 2. Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента для $k = 3$

Fig. 2. Geometric interpretation of the full factorial experiment for $k = 3$

Использование ротатабельного планирования второго порядка позволяет получить математическое описание протекающего в установке технологического процесса в виде уравнения множественной регрессии второго порядка. Для числа факторов $n = 3$ математическая модель будет иметь вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1^2 + b_8x_2^2 + b_9x_3^2, \quad (1)$$

где b_i – коэффициент уравнения множественной регрессии, $i = (\overline{0, n})$.

С помощью ротатабельного планирования второго порядка получено математическое описание протекающего в установке технологического процесса в виде уравнения множественной регрессии, определяющего зависимость времени получения брикета от содержания в формуемой смеси осадков сточных вод, древесных отходов и отходов нефтепродуктов:

$$y_1(x_1, x_2, x_3) = -17,803 - 0,356x_1 + 1,658x_2 - 0,53x_3. \quad (2)$$

Модель является адекватной при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$, так как $2,974 \leq F_{кр} = 5,05$. Перейдем в формуле (2) от безразмерных факторов x_1, x_2 и x_3 к размерным a, z и c , запишем математическую модель времени получения брикета

$$P(a, z, c) = 9,072 - 0,051a + 0,276z - 0,53c. \quad (3)$$

По результатам проведенного анализа качественных показателей и полученных данных эксперимента построены графические зависимости для определения оптимального соотношения компонентов с учетом оптимальной производительности. На рис. 3–5 представлены зависимости времени получения брикета P от процентного содержания в формуемой смеси осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c в виде поверхностей в трехмерной системе координат.

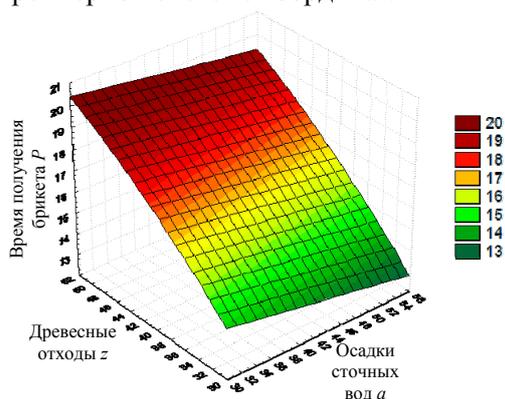


Рис. 3. Зависимость времени получения трехкомпонентного брикета P от процентного содержания осадков сточных вод a и древесных отходов z

Fig. 3. Dependence of time for obtaining three-component briquette P on percentage of sewage sludge a and wood waste z

Уравнение регрессии, определяющее зависимость плотности брикета от содержания в формуемой смеси осадков сточных вод, древесных отходов и отходов нефтепродуктов:

$$y_2(x_1, x_2, x_3) = 0,9075 + 0,0278x_1 + 0,0311x_2 + 0,0005x_3 - 0,0293x_1^2 - 0,0125x_2^2 - 0,0226x_3^2 + 0,0333x_1x_2 + 0,0071x_1x_3 - 0,0167x_2x_3. \quad (4)$$

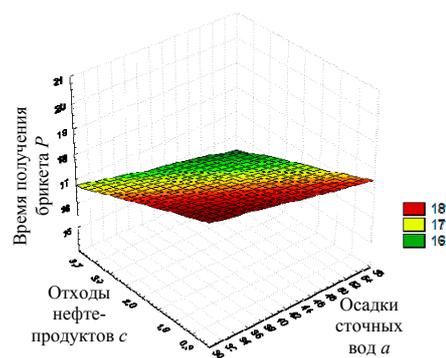


Рис. 4. Зависимость времени получения трехкомпонентного брикета P от процентного содержания осадков сточных вод a и отходов нефтепродуктов c

Fig. 4. Dependence of time for obtaining of three-component briquette P on percentage of sewage sludge a and waste of petroleum products c

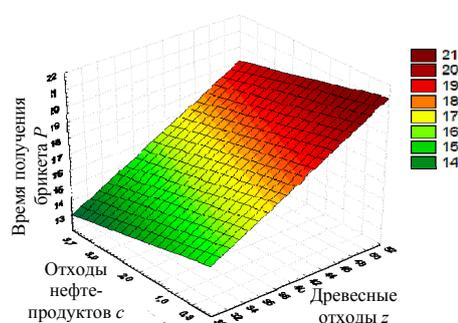


Рис. 5. Зависимость времени получения трехкомпонентного брикета P от процентного содержания древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c

Fig. 5. Dependence of time for obtaining three-component briquette P on percentage of wood waste z and waste of petroleum products c

Модель является адекватной при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$, так как $3,064 \leq F_{кр} = 5,05$. Перейдем в формуле (4) от безразмерных факторов x_1, x_2 и x_3 к размерным a, z и c , получим математическую модель показателя плотности брикета

$$U(a, z, c) = -0,733998 + 0,020828a + 0,005013z + 0,160819c - 0,000598a^2 - 0,000346z^2 - 0,022572c^2 + 0,000794az + 0,001020ac - 0,002778zc. \quad (5)$$

По результатам проведенного анализа качественных показателей и полученных данных эксперимента построены графические зависимости для определения оптимального соотношения компонентов с учетом минимальной влажности при оптимальных производительности и плотности. На рис. 6–8 приведены зави-

симости плотности брикета U от процентного содержания в формуемой смеси осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c в виде поверхностей в трехмерной системе координат.

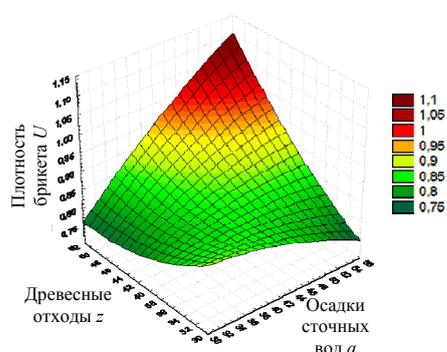


Рис. 6. Зависимость плотности трехкомпонентного брикета U от процентного содержания осадков сточных вод a и древесных отходов z

Fig. 6. Dependence of density of three-component briquette U on percentage of sewage sludge a and wood waste z

Технология получения MSF-топлива основана на влажном брикетировании многокомпонентных смесей с использованием связующих компонентов или материалов, обеспечивающих в составе брикетируемой смеси процессы объединения мелких разобщенных частиц в крупные структурные соединения с требуемыми геометрическими, механическими параметрами и необходимыми энергетическими свойствами [8]. Принципиальная схема подбора отходов при формировании многокомпонентных смесей представлена на рис. 9.



Рис. 9. Принципиальная схема подбора многокомпонентной смеси с использованием различных отходов

Fig. 9. Schematic diagram of selection of multicomponent mixture using various wastes

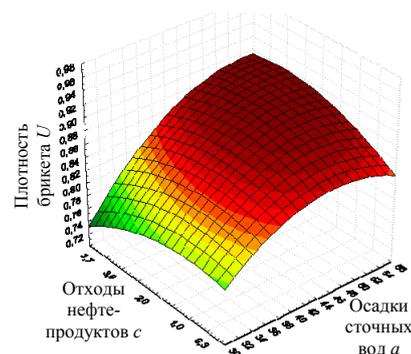


Рис. 7. Зависимость плотности трехкомпонентного брикета U от процентного содержания осадков сточных вод a и отходов нефтепродуктов c

Fig. 7. Dependence of density of three-component briquette U on percentage of sewage sludge a and waste of petroleum products c

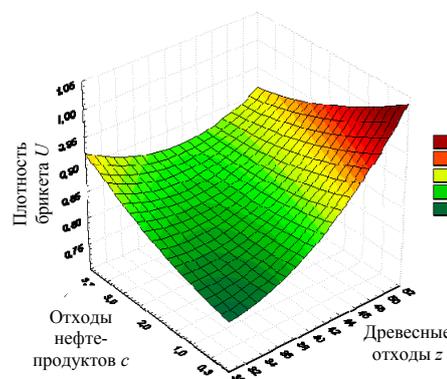


Рис. 8. Зависимость плотности трехкомпонентного брикета U от процентного содержания древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c

Fig. 8. Dependence of density of three-component briquette U on percentage of wood waste z and waste of petroleum products c

Технологическая схема многокомпонентного брикетирования представляет собой использование различных измельченных горючих отходов растительно-древесного происхождения. К ним, как правило, относят отходы деревообработки, лесозаготовок, солому, лузгу, костру и т. п. Они в большинстве разработанных составов являются базовыми компонентами, к которым можно добавлять другие виды горючих отходов в определенном (исследованном) соотношении. Например, возможно добавление таких горючих компонентов, не нашедших технологического применения, как отработанные нефтесодержащие сорбенты, топливные и масляные элементы фильтров, опилки и ветошь, насыщенные нефтепродуктами, осадки сточных вод очистных сооружений, отходы животноводства и птицеводства, коммунально-бытовые отходы и т. п. Важным условием брикетирования является определенный технологический цикл подготовки этих смесей, который рассматривался отдельно [2–8].

Особенность технологии получения MSF-топлива – влажное брикетирование многокомпонентных смесей с использованием связующих компонентов или специализированных веществ. В данной технологии добавление связующего компонента или специализированного вещества является обязательным (за исключением некоторых отходов) в силу того, что при этом решаются технологические задачи, обеспечивающие:

- интенсивность адсорбции связующего вещества с брикетируемыми частицами;
- качественное формирование поверхности, формы, плотности и необходимых типоразмеров брикетов;
- возможность регулирования теплоты сгорания (с использованием нефтесодержащих компонентов, органических и комбинированных связующих веществ);
- создание необходимой интенсивности затвердевания и прочности брикета при сушке.

Все разработанные в последнее десятилетие многокомпонентные составы твердого MSF-топлива оформлены в виде технических условий ТУ ВУ 490319372.002–2021 «Топлива твердые многокомпонентные котельно-печные» и прошли государственную регистрацию в БелГИСС (20.12.2021, № 063905). Применение технических условий обеспечивает выпуск продукции с использованием различных отходов, разделенных в ТУ на семь типов в зависимости

от общих особенностей формирования составов отходов и проведенных научных и практических исследований. Такой подход, в конечном итоге, обеспечивает оптимальное соотношение компонентов топлива, которое гарантирует наиболее полное сжигание используемых в нем горючих материалов с выделением заданных теплотехнических характеристик, соответствующих экологическим требованиям к выбросам загрязняющих веществ.

Исследование энергетических характеристик

Первый и второй законы термодинамики, из которых следуют фундаментальные уравнения, были получены для закрытых систем. При изменении состояния закрытых систем массы компонентов и, следовательно, состав системы не изменяются. Поэтому термодинамические потенциалы простых закрытых систем являются функциями только двух переменных:

$$\begin{aligned} dU &= TdS - PdV; & dH &= TdS + VdP; \\ dA &= -SdT - PdV; & dG &= -SdT + VdP. \end{aligned} \quad (6)$$

На практике при создании многокомпонентных составов встречаются системы (или части сложной закрытой системы), в которых при протекании различных процессов массы компонентов изменяются. Такое может происходить, например, при фазовых превращениях или вследствие химической реакции. При этом может изменяться состав как отдельных частей системы, так и системы в целом.

Поэтому внутренняя энергия (и другие термодинамические потенциалы) открытых систем будут изменяться за счет не только сообщения системе теплоты и произведенной системой работы, но и варьирования состава (массы) системы. Для открытых простых систем (без совершения системой полезной работы) характеристические функции будут функциями не только их двух естественных переменных, но и функциями числа молей всех веществ, составляющих систему:

$$\begin{aligned} U &= U(S, V, n_1, n_2, \dots, n_k); & P &= P(S, H, n_1, n_2, \dots, n_k); \\ A(T, V, n_1, n_2, \dots, n_k); & G &= G(T, P, n_1, n_2, \dots, n_k), \end{aligned} \quad (7)$$

где n_1, n_2, \dots, n_k – число молей каждого вещества, входящего в систему.

Тогда полный дифференциал внутренней энергии открытой системы можно записать следующим образом:

$$dU = \left(\frac{\delta U}{\delta S} \right)_{V, n_i} dS + \left(\frac{\delta U}{\delta V} \right)_{S, n_i} dV + \left(\frac{\delta U}{\delta n_1} \right)_{S, V, n_{j \neq i}} dn_1 + \dots + \left(\frac{\delta U}{\delta n_k} \right)_{S, V, n_{j \neq i}} dn_k, \quad (8)$$

где $n_{j \neq i}$ – индекс, означающий, что число молей других веществ, кроме данного, не изменяется.

Таким образом, химический потенциал компонента равен приращению характеристической функции системы при добавлении одного моля данного компонента при условии, что естественные переменные и состав системы остаются постоянными. Отсюда для простых открытых систем фундаментальное уравнение термодинамики с учетом изменения энергии описанных правилом фаз Гиббса запишется в виде

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i. \quad (9)$$

В формуле (9) каждое слагаемое можно рассматривать как произведение интенсивного свойства (обобщенной силы) на изменение экстенсивного свойства. Поэтому химический потенциал можно считать обобщенной силой, определяющей распределение масс компонентов в системе, что приводит к установлению в многокомпонентной гетерогенной системе фазового и химического равновесия.

Термодинамическая система МТТ, состоящая из различных по физическим или химическим свойствам частей компонентного состава в период формирования смеси, отделенных друг от друга поверхностями раздела, будет относиться к гетерогенной системе с использованием связующих компонентов на основе преимущественно вязких веществ. Наиболее простым и достаточно изученным источником связующего компонента являются углеводородсодержащие отходы [2–5]. Альтернативой применению этим отходам во многих составах твердого топлива может стать повсеместно распространенный осадок сточных вод (ОСВ) городских очистных сооружений, использование которого в смеси с древесно-растительными отходами позволяет уйти от углеродного следа в топливе. Производство топлива такого состава будет полностью относиться к топливу, полученному на основе биомассы, что расширяет возможности применения топлива и технологий в различных странах.

Проблема использования ОСВ с применением типовых технологий заключается в его повышенной зольности и высокой влажности исходной смеси. При этом ОСВ представляют собой дисперсную систему. Степень их дисперсности колеблется от 10 до 107 см⁻¹, что позволяет рассматривать осадки как коллоиды с повышенной вязкостью. Вязкость неоднородных масс, в частности осадков сточных вод, до сих пор не изучена ввиду исключительного разнообразия явлений и сложности вопроса. Однако на основании данных, полученных от комплекса исследований, в ходе которых выявлено, что осадки сточных вод, обладая повышенной вязкостью и высокой теплотой сгорания [9, 10], могут быть эффективно применимы в многокомпонентном брикетировании.

Полученные составы топлива с использованием ОСВ прошли полный комплекс теоретических и экспериментальных исследований химического состава, теплотехнических и физико-механических характеристик с применением традиционных лабораторных исследований, с различными соотношениями состава, параметрами плотности и влажности брикетов. Исследования проводились с участием аккредитованных лабораторий НИИ физико-химических проблем БГУ, Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Института механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси. Следует отметить, что изучались не только сбрикетированные многокомпонентные составы, но и зола, образующаяся от их сжигания. На рис. 10 представлены исследования ИК-спектрометрии образцов топлива с применением соотношения смеси 50 % ОСВ на 50 % древесных опилок.

На рис. 11 показаны результаты исследования с применением ИК-спектрометрии золы и топлива методом сравнения (наложения) кривых.

Сравнительный анализ веществ, основанный на избирательном поглощении излучения инфракрасной части спектра веществом при прохождении через него, показал, что в результате сгорания топлива произошло химическое преобразование одних соединений в другие, отображаемые спектром поглощения и пропускания (разные пики), характеризующие групповые частотные колебания связей и функциональных групп в исследуемых соединениях. Это говорит о полном дожиге карбонизированных компонентов состава многокомпонентного топлива, а также о разрушении (отсутствии) неароматических и ароматических веществ.

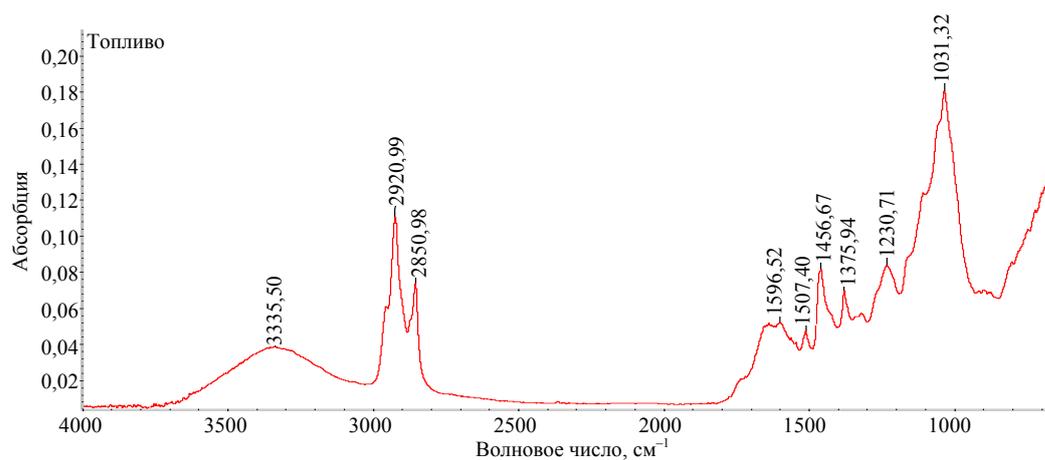


Рис. 10. ИК-спектрограмма брикетированного многокомпонентного топлива марки MKU7-1c

Fig. 10. IR-spectrogram of briquetted multicomponent fuel of brand MKU7-1c

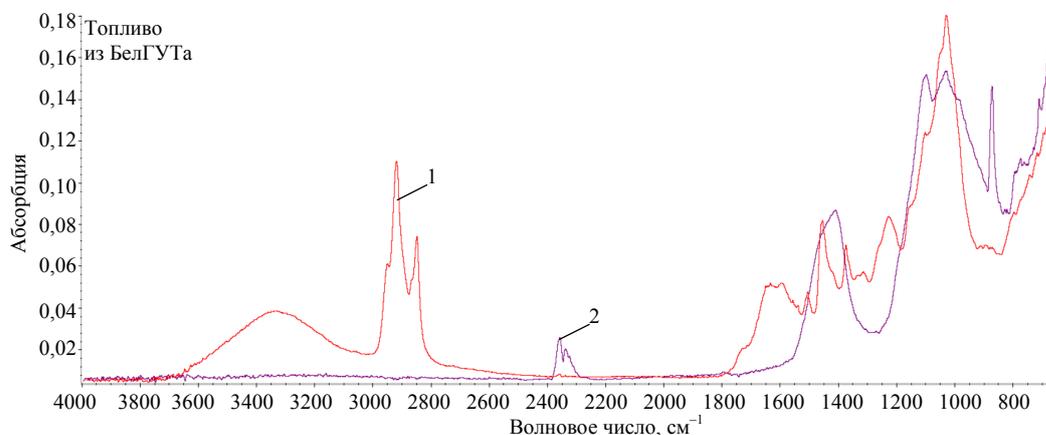


Рис. 11. Сравнение методом наложения ИК-спектрограмм брикетированного многокомпонентного топлива марки MKU7-1c (1) и золы (2), образовавшейся от сжигания

Fig. 11. Comparison by superimposition of IR-spectrograms of briquetted multicomponent fuel of the MKU7-1c brand (1) and ash (2) formed from combustion

При этом твердое топливо влажностью 30 % с использованием в составе ОСВ имеет низшую теплоту сгорания 11,9–12,5 МДж/кг, что соответствует требованиям СТБ 1919–2008 по теплоте сгорания торфобрикета марок БТ-2–БТ-6 (при влажности 20 % $Q_n^p = 12,6$ МДж/кг) и калорийному эквиваленту. Поскольку теплота сгорания МТТ влажностью 30 % сопоставима с торфобрикетом, в отдельных случаях или при необходимости (даже не досушивая брикеты до влажности 20 %) при сжигании может выделяться теплота сгорания, соответствующая торфяному топливу. Это обеспечит стабильную сырьевую базу и сэкономит энергоресурсы.

Разработаны оптимальные базовые составы МТТ, пригодные для использования в качестве энергоресурсов на предприятии КПУП «Гомель-

водоканал» с возможностью сжигания в котлах мощностью 0,5 и 1,0 МВт промышленной котельной. В табл. 1 представлен сравнительный анализ элементного химического состава горючей массы и теплоты сгорания различных видов твердого топлива.

Научная новизна данной технологии и накопленный практический опыт брикетирования, а также проведенные исследования характеристик составов топлива и инструментальные замеры выбросов вредных веществ при сжигании топлив с использованием наиболее распространенных видов отходов, образующихся на предприятиях промышленности, объективно показывают экологичность, энергоэффективность и перспективность внедрения технологий получения MSF-топлива с использованием горючих отходов.

Элементные составы горючей массы различных видов топлива
Elemental compositions of combustible mass of various types of fuel

Вид топлива	Состав топлива, %							Q, МДж/кг
	C	H ₂	N ₂	O ₂	S	A	W	
МТТ с углеводородсодержащими отходами	59–62	4,6–6,5	0,2–0,3	31–36	0,3–0,7	4,5–10,0	10,0–19,9	18,0–21,0
МТТ на основе ОСВ, марка 7	50–52	2,3–5,1	1,5–2,5	16–20	0,6	21,4–22,7	10,4–62,7	5,4–16,3
МТТ на основе ОСВ, марка 10	50–52	2,5–5,1	1,5–2,4	20–22	0,57–0,6	21,0–21,4	10,4–57,2	5,5–15,6
Торф	25–60	2,6–6,0	1,1–3,0	15–40	–	6,0–50,0	0–95,0	8,0–16,0
Древесина	48–52	6,0–7,0	0,1–0,6	43–45	–	–	60,0–95,0	12,5

Актуальность решения проблем переработки горючих отходов с применением доступных технологий подтверждается возросшим интересом к ее использованию не только в Республике Беларусь, но и в ряде стран Западной Европы (Сербии, Румынии) и Азии (Вьетнаме), где проведен ряд совместных экспериментальных и теоретических исследований [11–15].

ВЫВОДЫ

1. Определены оптимальные параметры брикетирования влажных многокомпонентных смесей, позволяющие получать топливо с приемлемыми плотностью и производительностью установки, использующей минимальную влажность смеси. Это дает возможность в промышленных объемах производить многокомпонентное твердое топливо, что способствует улучшению экологической обстановки и создает стабильную энергетическую базу для использования местных видов топлива.

2. Технология изготовления многокомпонентного твердого топлива методом брикетирования позволяет использовать широкий спектр горючих отходов в качестве связующего с возможностью его сжигания в различных теплогенерирующих устройствах с получением высоких энергетических параметров горения.

ЛИТЕРАТУРА

- Обращение с отходами: современное состояние и перспективы: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф., 13 дек. 2018 г. / под ред. И. О. Туктаровой. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. 260 с.
- Хрусталева, Б. Многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. Хрусталева, А. Пехота // Энергетика и ТЭК. 2011. № 11. С. 16–19.
- Хрусталева, Б. М. Энергоэффективное многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. Минск: БНТУ, 2013. Т. 1. С. 146.
- Хрусталева, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергоэффективность. 2016. № 4. С. 18–22.
- Хрусталева, Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 2. С. 122–140.
- Многокомпонентное твердое топливо [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Многокомпонентное_твердое_топливо. Дата доступа: 27.02.2022.
- Пехота, А. Н. Эффективное использование углеводородсодержащих промышленных отходов при создании топлива / А. Н. Пехота // IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa “Społeczeństwo i Gospodarka Wobecyzwań XXI wieku. Nauka Narzecz Poleczeństwa i Biznesu”. Белосток: Белостокский государственный политехнический университет, 2014. С. 71.
- Пехота, А. Н. Многокомпонентное твердое топливо / А. Н. Пехота; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. Гомель: БелГУТ, 2021. 243 с.
- Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water / A. N. Pekhota [et al.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 6. С. 525–537. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537>.
- Пехота, А. Н. Исследование теплотехнических свойств брикетов на основе осадков сточных вод городских очистных сооружений / А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова, В. Н. Грибанов // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы II Меж-

дунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. Минск: Ин-т ЖКХ НАН Беларуси, 2020. Т. 2. С. 99–108.

11. Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов / Б. М. Хрусталев [и др.] // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 1. С. 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65>.
12. Способ получения топлива твердого многокомпонентного: пат. 18408 Респ. Беларусь, МПК С 10 L 5/48, С 10 L 5/06, С 10 L 5/36 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталев. Оpubл. 30.08.2014.
13. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного: пат. 18463 Респ. Беларусь МПК С 10 L 5/04, С 10 L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталев; заявитель А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталев. Оpubл. 30.08.2014.
14. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного: пат. 18130 Респ. Беларусь МПК С 10 L 5/44, С 10 L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталев. Оpubл. 30.04.2014.
15. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного на основе осадков городских сточных вод: заявка ВУ № а20210298 / А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова [и др.]. Оpubл. 20.10.2021.

REFERENCES

1. Tuktarova I. O. (ed.) (2018) *Waste Management: Current State and Prospects: Collection of Papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference, December 13, 2018*. Ufa, Publishing House of Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), 260 (in Russian).
2. Khroustalev B., Pekhota A. N. (2011) Multicomponent Solid Fuel Based on Low-Utilized Waste. *Energetika i TEK [Energy and Fuel and Energy Complex]*, (11), 16–19 (in Russian).
3. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2013) Energy-Efficient Multicomponent Solid Fuel Based on Low-Used Waste. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Mater. II-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science to Education, Industry, Economics: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, BNTU, 146 (in Russian).
4. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Composite Solid Fuel Based on Secondary Combustible Waste. *Energo-effektivnost [Energy Efficiency]*, (4), 18–22 (in Russian).
5. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multi-Component Solid Fuel. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (2), 122–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140> (in Russian).
6. *Multicomponent Solid Fuel*. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Многокомпонентное_твердое_топливо. (Accessed 27 February 2022) (in Russian).
7. Pekhota A. N. (2014) Effective Use of Hydrocarbon-Containing Industrial Waste in the Creation of Fuel. *IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa “Społeczeństwo i Gospodarka Wobec Wyzwań XXI wieku. Nauka Narzecz Polceństwa i Biznesu”* [IV International Scientific Conference “Society and Economy in the Face of Challenges of the XXI Century”]. Białystok, Białystok State Polytechnic University Publ., 71 (in Russian).
8. Pekhota A. N. (2021) *Multicomponent Solid Fuel*. Gomel, BelGUT, 243 (in Russian).
9. Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Vu M. P., Romanuk V. N., Pekhota E. A., Vostrova R. N., Nguyen T. N. (2021) Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (6), 525–537. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537>.
10. Pekhota A. N., Vostrova R. N., Gribanov V. N. (2020) Study of the Heat-Exchange Properties of Briquettes on the Basis of the Main Resistant in the Work of the City Clean Clock. *Nauchno-Tekhnicheskii Progress v Zhilishchno-Kommunal'nom Khozyaistve: Materialy II Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Well-Technogenic Progress in Residential and Communal Equipment: Materials of the II International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Institute of Housing and Communal Services of the National Academy of Sciences of Belarus, 99–108 (in Russian).
11. Khroustalev B. M., Pekhota A. N., Nguyen N. T., Vu P. M. (2021) Solid Fuel Based on Waste of Low-Utilized Combustible Energy Resources. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 20 (1), 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65> (in Russian).
12. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *Method for Producing Multicomponent Solid Fuel*: Patent Republic of Belarus No 18408 (in Russian).
13. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *Composition for Briquetting Multicomponent Fuel*: Patent Republic of Belarus No 18463 (in Russian).
14. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *Composition for Briquetting Multicomponent Fuel*: Patent Republic of Belarus No 18130 (in Russian).
15. Pekhota A. N., Vostrova R. N. [et al.] (2021) *Composition for Briquetting Multicomponent Fuel Based on Urban Waste Water*: Patent Application No a 20210298 (in Russian).

Received: 21.12.2021

Accepted: 24.01.2022

Published online: 31.03.2022